

Antti Teirikko

Taajuusmittausmenetelmä resonaattoreiden tarkistukseen

Taajuusmittausmenetelmä resonaattorien tarkistukseen

Antti Teirikko
Opinnäytetyö
2018
Ylempi ammattikorkeakoulututkinto,
Teknologia liiketoiminta
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Ylempi Ammattikorkeakoulututkinto, Teknologialiiketoiminta

Tekijä: Antti Teirikko
Opinnäytetyön nimi: Taajuusmittausmenetelmä resonaattorien tarkistukseen
Työn ohjaaja: Timo Vainio
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018
Sivumäärä: 64 + 6

Resonaattorin valmistustarkkuusvaatimukset ovat lisääntyneet automatisoituun viritykseen siirtymisen myötä. Perinteinen mekaanisiin mittoihin perustuva spesifikaatio ei enää riitä, koska virityselementin vaihtoa ei tueta automatisoidussa viritystavassa. Tarkkuusvaatimusten tiukentumisen vuoksi käyttöön on otettu resonaattorin resonanssitaajuuteen perustuva spesifikaatio. Mittaus suoritetaan siihen erikseen suunnitellussa osaspesifisessä mittaelementissä eli cavityssä.

Taajuuteen perustuvan spesifikaation yleistyessä mittauksissa käytettyjen mittacavityjen valmistuserien välillä huomattiin taajuuseroja, jotka aiheuttivat tulkintaongelmia mittaustuloksissa. Tämän vuoksi tarvittiin ratkaisu, jolla eri mittacavityjen väliset taajuuserot voidaan häivyttää.

Työssä tutkittiin eri vaihtoehtoja resonaattorien taajuusmittauksen kehittämiseksi niin että, eri mittacavityillä tehdyt mittaukset olisivat suoraan keskenään vertailukelpoisia. Työ sisältää erityyppisiä testauksia, ratkaisumalleja ja pohdintaa eri mallien hyödyistä sekä haitoista.

Vaihtoehdot kartoitettiin ja valittiin käyttöön malli, jossa mittacavityillä on kiinteä osaspesifinen kerroin, jonka avulla voidaan suhteuttaa tehdyt mittaukset Golden cavityn suhteen. Ratkaisu on otettu käyttöön kaikkine tarvittavine muutoksineen.

Asiasanat: RF-suodatin, Resonaattori, Virittäminen, resonanssi, Cavity

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Master Degree Program, Business Technology

Author: Antti Teirikko
Title of thesis: Frequency measuring system for resonator inspection
Supervisor: Timo Vainio
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2018
Number of pages: 64 + 6

Accuracy requirements for resonators are tightened with the transition to the automated tuning system. Traditional specification which is based on mechanic measures is not enough anymore, because changing of the tuning screw is not allowed with automated tuning system. Specification which is based on the resonator resonance frequency has been brought into use. The measuring is performed in a part specific measuring cavity.

As frequency-based specification becomes more commonly in use, frequency differences between the used cavities become a problem. Frequency errors caused a difficulties of interpretation results between the different cavities. Solution was needed to proportion measurements between the cavities.

Different options were investigated to find the solution where all the measurements were comparable to each other. Work includes several types of testing, possible solutions and reflection on the benefits and disadvantages of the different solutions.

The alternative solutions were studied and a model with a fixed part specific coefficient factor on the cavity was chosen into use. The coefficient can be used to proportion the measuring's between the different cavities. The solution has been brought into use with all its necessary changes

Keywords: RF-filter, Resonator, Tuning, resonance, Cavity

ALKULAUSE

Tämä tutkimustyö on tehty Nokia Networks and Solutionsille tuotekehityksen sekä ylläpito-organisaation tarpeisiin.

Opinnäyte tehtiin aiheesta, jolle haettiin pikaista ratkaisua. Nykyinen työni Nokialla mahdollisti mutkattoman yhteistyön kollegoiden, tuotekehityksen, tuotannon sekä alihankkijoiden kanssa.

Työ tehtiin tuotekehityksen sekä ylläpito organisaation yhteistyönä. Tavoitteena oli ratkaisun nopea käyttöönotto, sillä ongelmat resonaattorien taajuusmittauksissa näkyivät myös uusilla tuotteilla, vaikeuttaen mittausten tulkintaa. Tuotekehityksen tekemät RF-simuloinnit sekä tarkkuustyöstettyjen resonaattorisarjojen valmistus auttoivat tutkimaan eri ratkaisuvaihtoehtoja ja löytämään toimivan ratkaisumallin johtaen menetelmän käyttöönottoon globaalisti.

Kiitän Pirjo Haurua, joka työskenteli tuotekehityksessä saman ongelman parissa ja avusti suunnittelussa sekä mallinnuksessa, simuloimalla tarvittavat malliresonaattorit. Kiitän myös Jukka Kilpelää, joka avusti resonaattorierien valmistuksessa sekä kollegoitani Mikko Pyrröä ja Veijo Moilasta, jotka avustivat työn eri vaiheissa. Veijo Moilanen toimi lisäksi työn valvojana auttaen sisällön ja tekstin jäsentämisessä. Kiitän myös vaimoani Katja Juntusta, joka avusti kieliasun tarkistuksessa.

18.04.2018 Antti Teirikko

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
MERKINNÄT JA LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	9
2 TEORIA	11
2.1 Suodattimet	11
2.2 Resonanssi	13
2.3 Resonaattori	14
2.4 Koaksiaaliresonaattori	14
2.5 Koaksiaaliresonaattorin toiminta	15
2.6 Koaksiaaliresonaattorin taajuus	16
2.7 Simulointi mittacavityssä	17
2.8 Q-arvo	18
3 AUTOMAATION TUOMAT HAASTEET	20
3.1 Resonaattorin valmistusprosessi	20
3.2 Taajuusvaatimuksen taustaa	21
3.3 Cavityjen väliset taajuuspoikkeamat	22
4 RESONAATTORIN MITTAUSSYSTEEMI	23
4.1 Resonaattoreiden taajuusmittaus	23
5 VAIHTOEHDOT MITTAUSTAVAN KEHITTÄMISEKSI	26
5.1 Referenssiin perustuva mittaustapa	27
5.2 Suora mitta	28
5.3 Vertaileva mitta	28
6 REFERENSSIRESONAATTORIEN VALMISTUS	29
6.1 Protoresonaattoreiden testaus	33
7 TAAJUUSSÄÄTÖINEN KANSI	36
7.1 Taajuussäätöisen kannen valmistus ja testaus	37
7.2 Mittauscavityn sekä virityskannen toiminta	37
7.3 Mittauskannen lukitus	39

7.4 Testaus	41
7.5 Tulokset	41
8 KIIINTEÄ KANSI	44
8.1 Suhteellinen taajuusvirhe kahden eri cavityn välillä	44
8.2 Referenssiresonaattorin keskiarvoistus ja cavityjen toistuvuus	47
9 SUHTEELLINEN MITTAUSTAPA	51
9.1 Suoran ja suhteellisen mittaustavan vertailu	51
9.2 Mittaussarja lähellä referenssitaajuutta	52
9.3 Mittasarja kaukana referenssitaajuudesta	53
9.4 Suhteellisen mittaustavan tarkkuus	54
9.5 Testin tulokset	55
10 VALITTU PARANNUSVAIHTOEHTO	58
10.1 Valitun mallin toteutus sekä implementointi	58
11 YHTEENVETO	60
11.1 Kertoimen käyttö	60
11.2 Taulukon käyttö kertoimen laskennassa	61
LÄHTEET	63
LIITTEET	63
Liite 1 Koneistettujen resonaattorien toistuvuus	
Liite 2 Säädetävän mittakannen tarkkuus	
Liite 3 Taajuuserojen suhde cavityjen välillä	
Liite 4 Suhteellinen mittaustapa, toistuvuus	
Liite 5 Suhteellinen mittaustapa, kertoimen käyttö	
Liite 6 Kertoimen laskentataulukko	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

ω	kulmataajuus [rad/s]
f	Taajuus [Hz]
ε_r	dielektrinen vakio
ω_r	resonanssikulmataajuus [rad/s]
P	Teho [W]
P_1	resonaattorin häviöteho
$\lambda / 2$	puolen aallon resonaattori [m]
$\lambda / 4$	neljännesosa aallon resonaattori [m]
Q	resonaattorin hyvyysluku
C	kapasitanssi [F]
L	induktanssi [H]
R	resistanssi [Ω]
TEM	resonaattorin toimintatila ilman etenemissuuntaista komponenttia
RX	vastaanotin
TX	lähetin

1 JOHDANTO

Tukiasemasuodattimien valmistus on tietotekniikan sekä automaation kehityksen johdosta muutoksessa, jossa perinteinen operaattoreiden suorittama tukiasemasuodattimen kokoaminen sekä virittäminen ovat siirtymässä yhä enemmän robottien tehtäväksi. Virityksen automatisointi on kehittynyt nopeasti, ja nykyisin suodattimet suunnitellaan niin, että viritys on automatisoitavissa.

Viritysausomaatio asettaa tiukemmat vaatimukset sekä mekaniikan mittatarkkuudelle ja suodattimen valmistustarkkuudelle. Valmistettujen suodattimien tulee olla mahdollisimman tarkkoja kopioita toistensa suhteen automaattivirityksen perustuessa mallisuodattimeen, jonka S-parametreista on tehty kytkentämatriisi, jonka säätökäyriä seuraamalla voidaan viritettävän suodattimen taajuuDET ja kytkennät iteroida mallisuodattimen arvoihin.

Perinteisessä operaattoreiden suorittamassa manuaalisessa virityksessä oli mahdollista vaihtaa viritysruuveja säätövarojen loppuessa. Suodattimessa oli myös muun tyyppisiä säädettäviä kytkentäelementtejä. Automaattivirityksessä kaikkien parametrien tulee olla ruuvisäätöisiä ja viritysruuvin vaihtaminen keskeyttää viritystapahtuman. Automaattivirityksen asettamien vaatimusten vuoksi suodattimista olisi pyrittävä tekemään mahdollisimman tarkkoja kopioita toisistaan. Tämä asettaa uusia haasteita tuotannon kokoonpanotyölle sekä mekaanisten osien tarkkuusvaatimuksille.

Tukiasemasuodattimen sisältämät resonaattorit vaikuttavat suoraan piirikohtaisiin viritystaajuuksiin. Mekaniikan valmistus perustuu yleensä mekaanisiin mittoihin, mutta automaattisessa virityksessä tarkkuus ei ole riittävä. Tämän vuoksi käyttöön on otettu lisävaatimus, joka perustuu resonaattorin resonanssitaajuuteen määritellyssä ympäristössä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia eri vaihtoehtoja nykyisen resonaattorin taajuusmittauksen kehittämiseksi ja löytää uusi mittaustapa, jossa voidaan ottaa huomioon mittaympäristöjen poikkeavuudet.

Nykyisessä mittaustavassa resonaattorit mitataan mittacavityissä suoraan spesifikaatiota vasten. Mittaustapa ei ota huomioon cavityjen välisiä taajuuseroja, jonka vuoksi eri cavityillä tehtyjen mittausten välille tuli mittavirhettä ja tulokset eivät olleet keskenään vertailukelpoisia. Cavityjä ei myöskään oltu yksilöity, joten eri cavityjen väliset taajuuserot eivät olleet tiedossa.

Teoriaosassa käsitellään suodattimen toimintaa, suodatintyyppejä sekä resonaattoreita. Työn tutkimusosassa on tarkasteltu eri vaihtoehtoja mittaustavan kehittämiseksi, referenssiresonaattorien valmistusta sekä valmistustarkkuutta, eri mittaustapojen eroavaisuuksia sekä toiminnallisuutta ja mittauksien välisiä toistotarkkuuksia. Työhön liittyy useita testauksia, joiden avulla saatiin työn kannalta tärkeää tietoa.

2 TEORIA

Tämän kappaleen tarkoitus on antaa perustietoa radiotaajuussuodattimista, suodattimen osana olevasta resonaattorista sekä siihen liittyvistä ilmiöistä sekä mitauksesta.

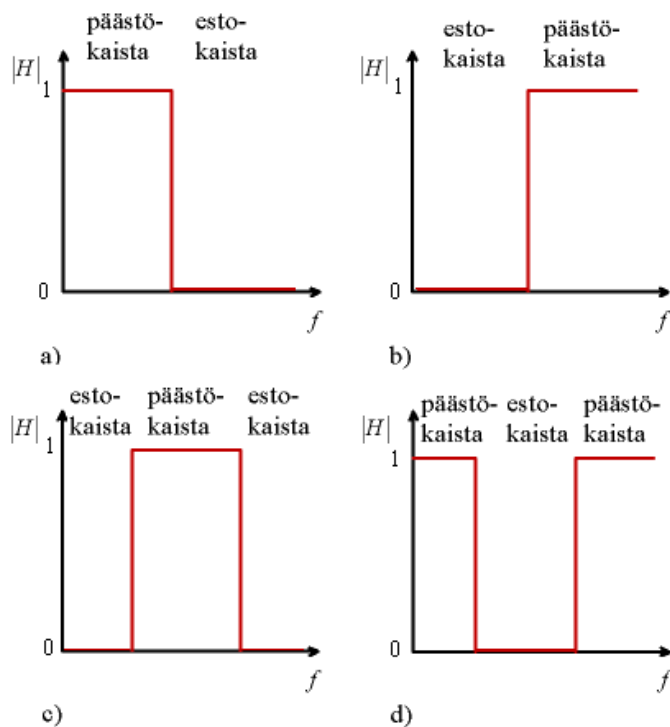
2.1 Suodattimet

Suodattimet ovat tärkeitä komponentteja radiospektrin käytön tehokkuuden kannalta. Suodattimia käytetään lähettimissä, ja vastaanottimissa eritaajuisten signaalien erottamiseen ja signaalin spektrin muokkaamiseen. Signaalia voidaan suodattaa kantataajuudella, välitaajuudella tai suurtaajuudella. Usein signaalia suodatetaan kaikissa näissä vaiheissa (Lehto, Räisänen 2006, 87).

Suodattimet voidaan jakaa aktiivisiin tai passiivisiin suodattimiin. Aktiiviset suodattimet tarvitsevat virransyötön toimiakseen ja tyypillisesti niissä on myös signaalia vahvistavia aktiivikomponentteja kuten transistoreja tai operaatiovahvistimia. Passiiviset suodattimet taas koostuvat komponenteista, jotka eivät välttämättä tarvitse jännitettä toimiakseen. Passiivisia suodattimia ovat mm. kondensaattorit, kelat, vastukset sekä radiotaajuussuodattimen tapauksessa värähtelijät eli resonaattorit.

Suodattimet jaetaan suodatustyyppin mukaan. Signaaleja muokataan suodatuksella eri tavoin: 1) rajaamalla läpimeneviä taajuuksia 2) poistamalla kohinaa 3) estämällä ei toivottujen taajuuksien pääsy määrätylle taajuuskaistalle. Suodattimella on aina päästökaista, joka päästää taajuudet läpi muuttumattomina, sekä estokaista, joka estää signaalien kulun.

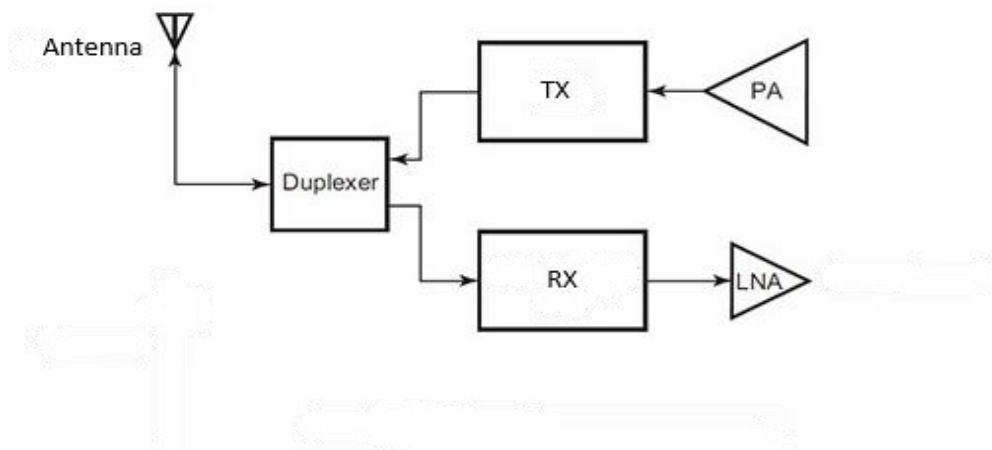
Yleiset suodatintyypit ovat seuraavat: Alipäästösuo datin (kuvio 1a), joka toimii siten että päästää alemmat taajuudet läpi suodattaen ylemmät taajuudet pois. Ylipäästösuo datin (kuvio 1b) taas päästää ylemmät taajuudet ja suodattaa matalat taajuudet pois. Kaistanestosuo dattimen (kuvio 1d) tarkoitus on estää määrätyn taajuuskaistan läpäisy päästäen rajatun kaistan ulkopuoliset signaalit läpi. Kaistanpäästösuo datin (kuvio 1c) taas päästää läpi vain määrätyn taajuuskaistan, mutta suodattaa sen ala sekä yläpuoliset taajuudet pois.



Kuvio 1. Suodatintyyppien ideaalimallit. (Kuisma 2017).

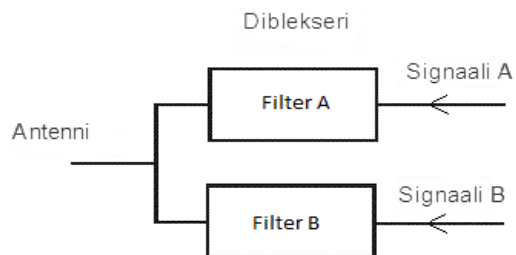
Tukiasemassa käytettävän suodattimen tehtävänä on eristää vastaanotin suuri-tehoisesta lähetinsignaalista sekä puhdistaa lähetyssignaali kaistan ulkopuolisista signaaleista, jotka voivat häiritä muita järjestelmiä. Suodattimen tehtävänä on myöskin estää muiden järjestelmien signaalit, jotka voisivat häiritä järjestelmän toimintaa. (Karhu, 2015).

Radiotaajuussuodattimien on kyettävä sekä lähettämään että vastaanottamaan radiosignaalia käyttäen samaa antennia. Tällaista radiotaajuudella toimivaa suodatinjärjestelmää kutsutaan dublekseriksi. Dublekseri sisältää vastaanotinosan, lähetinosan sekä yhteisen antennin. Tämä mahdollistaa yhtäaikaisen lähetyksen ja vastaanoton samassa antennilinjassa.



Kuvio 2. Yksinkertaistettu Duplekserin lohkokaavio

Duplekseri käyttää myös samaa antennia kuten Duplekseri toimien passiivisena Yli/-alipäästösuotimena, jolla yhdistetään tai erotetaan kahden eri taajuusalueen signaalit samassa siirtolinjassa.



Kuvio 3. Yksinkertaistettu diplekserin lohkokaavio

2.2 Resonanssi

Resonanssi eli myötävärähtely tarkoittaa tilaa, jossa värähtelykykyiseen systeemiin tai esineeseen vaikuttaa ulkopuolinen voima, aiheuttaen värähtelyn, jonka taajuus on sama tai lähelle sama kuin systeemin ominaisvärähtelytaajuus. Tällaisen värähtelyyn johtavan ulkopuolisen voiman voi aiheuttaa joko mekaaninen

liike, sähkökenttä taikka magneettikenttä. Värähtelyn ollessa resonanssissa värähtely on erityisen voimakasta yhtäaikaisten värähtelyiden voimistaessa toisiinsa. Värähtely on sinimuotoista resonanssitaajuudella. (Suomi, 1990.)

2.3 Resonaattori

Resonaattori on taajuusselektiivinen värähtelijä, jolla on luonnollinen värähtelytaajuus, amplitudiltaan muita taajuuksia voimakkaampaa värähtelytaajuutta kutsutaan resonanssitaajuudeksi. Värähtely voi olla joko mekaanista, sähkömagneettista taikka akustista eli ääntä. (Suomi, 1990.)

2.4 Koaksiaaliresonaattori

Koaksiaaliresonaattoreita, joita käytetään mm. Nokian valmistamissa suodattimissa ovat tyypiltään neljännesaallon resonaattoreita. Resonaattorit ovat sylinterimäisiä, toisesta päästään umpinaisia ja toisesta päästään avoimia, ilmatäytteisiä, hyvin johtavaksi pinnoitettuja resonaattoreita.

Koaksiaaliresonaattorit valmistetaan hyvin muokkautuvasta metalliseoksesta, joko koneistamalla, syvävetämällä taikka kylmämuokkaamalla. Mittavaatimuksiltaan resonaattorit ovat tarkoin määriteltäviä elementtejä, jotka pinnoitetaan riittävän hyvyysarvon (Q-value) saavuttamiseksi. Resonaattoreita hienosäädetään erillisillä virituselementeillä. Yksi tukiasemasuodatin sisältää useita resonaattoreita. Mitä enemmän resonaattoreita suodattimen piippu sisältää sitä parempi dynamiikka voidaan saavuttaa.

Koaksiaaliresonaattoreiden lisäksi nykyaikaisissa radiotaajuussuodattimissa käytetään myös keraamisia resonaattoreita, niiden mahdollistaman tilansäästön sekä paremman päästövaimennuksen ja tehonkeston vuoksi. Huonoina puolina on korkea hinta suhteessa perinteiseen koaksiaaliresonaattoriin sekä haastava valmistus missä seossuhde ja toistuvuus on vaikeaa pitää stabiilina.

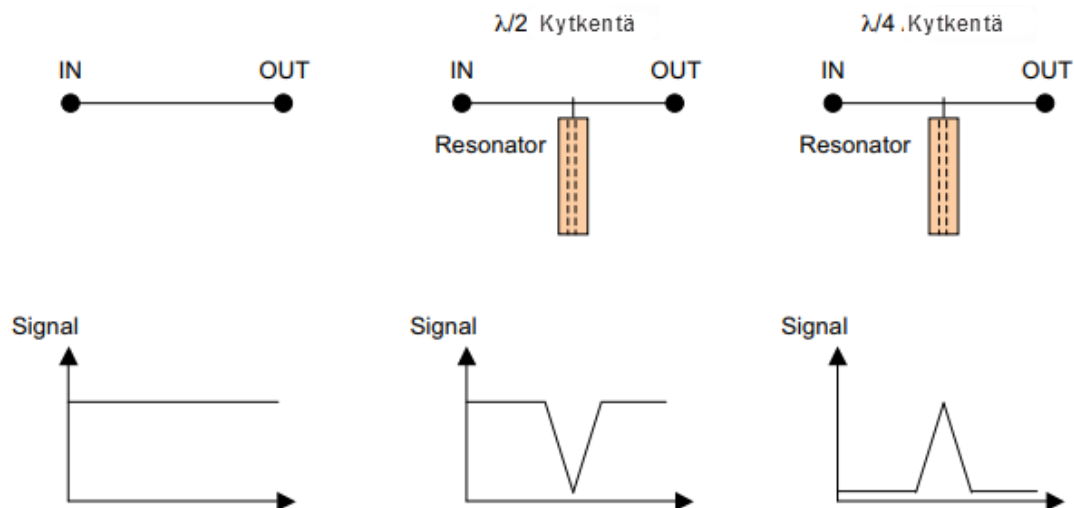
Osa tukiasemasuodattimessa käytettävistä resonaattoreista voidaan tehdä myös suoraan valumenetelmällä suodattimen runkoon ja koneistaa resonaattoreiden yläosa jälkeinpäin valamisen jälkeen riittävän mittatarkkuuden saavuttamiseksi.

Tätä valmistustapaa voidaan käyttää suodattimiin vain osin, sillä niissä suodattimen osioissa, missä tarvitaan sekä hyvää tehonkestoa että riittävän hyvää lämpökompensointia, ei menetelmää voi käyttää vaan, resonaattorit valmistetaan erillisinä elementteinä.

2.5 Koaksiaaliresonaattorin toiminta

Koaksiaaliresonaattoreiden toimintatila TEM (Transverse Electro-Magnetic) tarkoittaa tilaa, jossa sekä sähkö- että magneettikenttä ovat liikettä vastaan kohtisuorassa, jolloin niillä ei ole lainkaan etenemissuuntaista komponenttia. Aaltomuoto esiintyy vapaassa avaruudessa etenevässä säteilyssä, vähähäviöisissä koaksiaalijohdoissa ja eräissä muissa useampijohdimisissa aaltojohdoissa. (S. Grant, W. R. Phillips).

Kuviossa (4) on kuvattu kytkennät, missä signaali kulkee sisäänmenosta (IN) ulostuloon (OUT). Kun koaksiaaliresonaattori on kytkettynä linjaan, se joko sallii tai estää signaalien kulun, riippuen onko kyseessä $\lambda/2$ - tai $\lambda/4$ - resonaattorikytkentä, mikroaaltoenergian vasteen resonanssitaajuudella.



Kuvio 4. Koaksiaaliresonaattoreiden toimintamalli resonanssitaajuudella (Exxelia 2018).

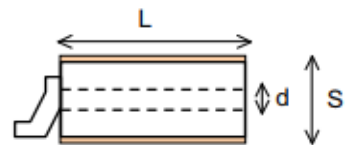
2.6 Koaksiaaliresonaattorin taajuus

Koaksiaaliresonaattorin taajuus lasketaan ulkoisten mittojen perusteella. Resonaattorin mitat suunnitellaan yleensä varsin lähelle puolen tai neljännesosa-aallon pituutta tavoitellusta taajuudesta. Resonaattorit ovat siten määriteltä joko puolen aallon tai neljännesosa-aallon resonaattorityypeiksi. (Exxelia 2018, 143)

Neljännesosa aallon resonaattoreilla toinen pää on kytkettynä (oikosuljettuna) resonaattorin toisen pään ollessa avonainen, puolen aallon resonaattoreilla taas molemmat päät ovat kytkettyinä. Taajuudet resonaattorityypeille lasketaan alla olevan kuvan mukaisesti, Missä f (GHz) on resonanssitaajuus, L (mm) on resonaattorin mitta ja ε_r on eristysvakio

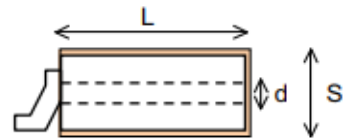
- $\lambda/2$ Resonaattori

$$f = \frac{300}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}$$



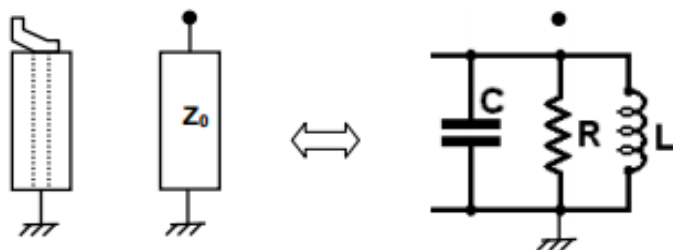
- $\lambda/4$ Resonaattori

$$f = \frac{300}{4L\sqrt{\varepsilon_r}}$$



Kuvio 5. Resonaattorityypit (Exxelia 2018).

Koaksiaaliresonaattorin impedanssilla on suora yhteys sisäreiän halkaisijaan ja eristysvakioon. Vastaava kytkentä voidaan esittää RLC sijaiskytkennällä. (Exxelia 2018, 143).



Kuvio 6. koaksiaaliresonaattorin sijaiskytkentä (Exxelia 2018).

2.7 Simulointi mittacavityssä

Jotta yksittäisen resonaattorin toimintaa suodattimen osana voitaisiin tutkia luotettavasti, on resonaattorin käyttöympäristö kyettävä mallintamaan tarkasti. Resonaattorin toiminta perustuu itse resonaattoriin sekä sitä ympäröivien seinämien ja rajapintojen geometriaan, mittoihin ja materiaaleihin. Mittausympäristön fyysillä mitoilla on suora vaikutus resonaattorin toimintaan, joten käytettäessä väärää mittausympäristöä eivät mitatut vasteet korreloi todellisuuden kanssa.

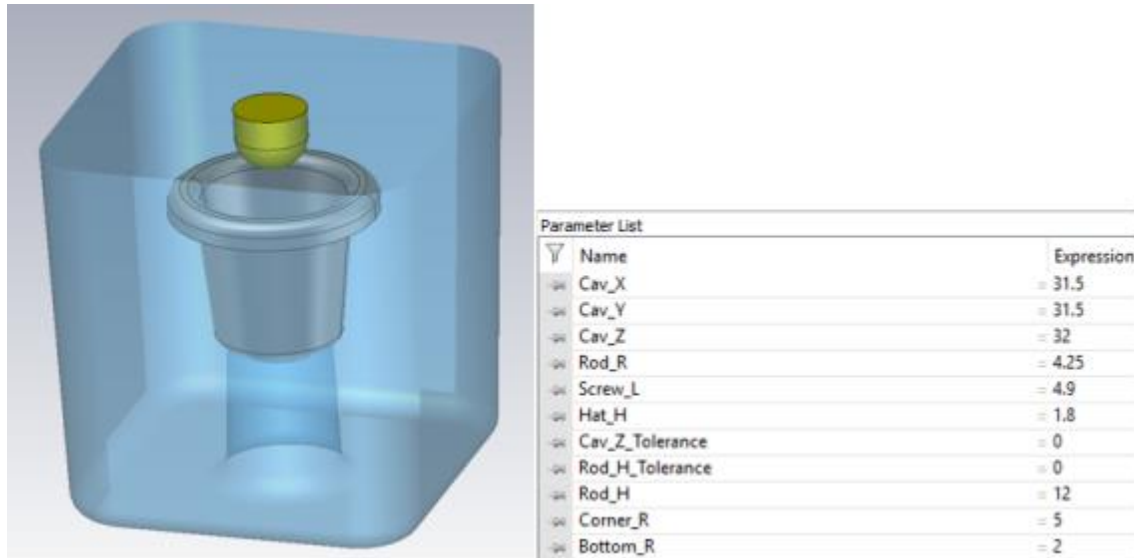
Yksittäisen resonaattorin toimintaa ei simuloida suodattimessa itsessään, tukiasemasuodattimen monimutkaisuuden ja sen vaatiman suuren laskennan vuoksi. Resonaattorin toimintaa yksinkertaistetaan simuloimalla se yksittäisessä cavityssä, jonka mitat perustuvat suoraan suodattimen mittoihin. Näin saadaan riittävän nopea, mutta halutuilta parametreiltaan riittävän tarkka simulaatio.

Mittacavity mahdollistaa resonaattorin toiminnan tutkimisen käytäntöä vastaavassa ympäristössä. Saadut mittaus- tai simulointitulokset voidaan suoraan rinnastaa tilanteeseen, jossa resonaattori toimii osana suodatinta.

Automaattivirityksen vaatimuksena on riittävä resonaattorin taajuuden säätö vaihtamatta virityselementtiä. Suunnittelussa on otettava huomioon toleranssiketjun kaikki muuttujat eli käytännön mekaaninen mittatarkkuus kaikissa valmistusvaiheissa. Kun muuttujat tiedetään, voidaan resonaattoreille määritellä taajuusvaatimus eli tarkoin määritelty taajuusalue osaspesifisessä mittaelementissä.

Simulointi tehdään käyttäen simulointiohjelmaa. Cavityn, että resonaattorin mitat saadaan suoraan tuotua 3D-piirustusohjelmasta. Luotua ympäristöä voidaan muokata lisäämällä siihen haluttuja muuttujia sekä ajamalla erityyppisiä simulaatioita, joilla nähdään tehtyjen muutosten vaikutus haluttujen parametrien osalta.

Kuvassa alla on simuloitu mittacavityn sekä resonaattorin kuormituksen vaikutusta taajuuteen sekä tehonkestoon.



Kuvio 7. Simulointimalli (Rousti).

2.8 Q-arvo

Q-arvo eli hyvyysluku kuvaa resonaattorin taajuusselektiivisyyttä: mitä suurempi Q-arvo on, sitä kapeammalla taajuuskaistalla resonaattoriin absorboituu tehoa. Toisin sanoen, kuinka kauan resonaattorilla kestää siihen varastoituneen energian purkamiseen ja paluu alkutilaan.

Hyvyysluku Q määritellään

$$Q = \frac{\omega_r W}{P_1}$$

,jossa ω_r on resonanssikulmataajuus, W on resonaattoriin varastoitunut energia ja P_1 on häviöteho. (Räisänen, Lehto, 2007, 111).

3 AUTOMAATION TUOMAT HAASTEET

Viritysautomaation yleistyessä on suodattimissa käytettävien osien valmistustarkkuuteen jouduttu kiinnittämään huomiota. Erityisesti resonaattorien valmistustarkkuus sekä toistettavuus vaativat huomiota, sillä resonaattorien taajuuden hienosäätö toteutetaan elementeillä, joiden säätöalue on rajallinen.

Operaattoreiden suorittamassa viritystavassa taajuussäädön loppuessa kesken voidaan tilanne korjata vaihtamalla käytettävää virityselementtiä (viritysruuvi). Automatisoidussa virityksessä taas säätövaran loppuminen johtaa viritystapahtuman keskeytykseen ja tarpeettomaan ajanhukkaan

3.1 Resonaattorin valmistusprosessi

Syvävetämällä (Deep Drawn) valmistettujen resonaattoreiden valmistusprosessia ei ole tarkoin määritetty, vaan se vaihtelee mekaniikkatoimittajien käytäntöjen mukaan. Valmistetun osan vaatimukset (spesifikaatio) määritellään yleisesti mekaniikkakuvassa, lisäksi taajuuden osalta resonaattorin taajuusmittaohjeissa. Valmistaja vastaa siitä, että valmistettu osa täyttää asetetut vaatimukset, joita ovat mekaanisiin mittoihin perustuvat vaatimukset, taajuusvaatimukset sekä pinnoitusvaatimukset.

Osan valmistus syvävetämällä tarkoittaa valmistustapaa, missä käytetään tarkoitukseen valmistettua muottia, jonka avulla pakotetaan metallilevyä suurella voimalla, monessa eri puristusvaiheessa, kunnes saavutetaan haluttu lopullinen muoto. Puristusvaiheen jälkeen valmiit resonaattorit leikataan pois aihioista lyömällä, jonka jälkeen ne hiotaan, pinnoitetaan sekä tarkistetaan vaatimuksenmukaisuus testeillä, joihin sisältyy sekä mekaanisten mittojen tarkistus ja resonaattorin taajuusmittaus.



Kuvio 8. Erityyppisiä vetämällä valmistettuja resonaattoreita

Valmistustapa vaatii jatkuvaa seuranta, koska metallien eräkohtaisissa ominaisuuksissa on eroja ja valmistukseen käytetty muotti myös kuluu käytössä. Tämän vuoksi eri valmistuserien välillä voi olla vaihtelua. Toistettavuuden vuoksi tarvitaan seuranta sekä valmistusprosessin säätöä. Tarkan lopputuloksen saavuttamiseksi toimittajat pyrkivät valmistamaan kerralla mahdollisimman ison resonaattorierän pyrkien optimoimaan prosessin säätökustannuksia sekä eräkohtaista vaihtelua.

3.2 Taajuusvaatimuksen taustaa

Kun resonaattorin lisäspesifikaatio otettiin käyttöön ensimmäiseen automaattiviritteiseen tuotteeseen, teetettiin alihankkijoilla erä mittacavityjä. Cavityt verifioitiin Nokian toimesta ja lähetettiin toimittajille resonaattoreiden valmistuksen seuranta varten sekä valmistaville tehtaille resonaattoreiden vastaanottotarkastusta varten. Spesifikaation käyttöönoton myötä resonaattoreiden valmistustarkkuus koheni huomattavasti suhteessa tilanteeseen, jossa resonaattorit valmistettiin ainoastaan mekaniikkakuvassa määriteltyjen valmistustarkkuuksien mukaisesti.

Automaattivirityksen yleistyessä huomattiin taajuusvaatimuksen hyödyt tuotanto-prosessiin ja lisäspesifikaation käyttöönottoa laajennettiin myös muihin tuotteisiin. Sama mittacavity soveltui suoraan käytettäväksi sellaisenaan useisiin muihinkin tuotteisiin. Jota myös käytettiin laajalti, helpon ylläpidon mahdollistamiseksi.

3.3 Cavityjen väliset taajuuspoikkeamat

Kun mittacavityjä otettiin käyttöön eri tuotteilla, alihankkijoilla teetettiin useita valmistuseriä. Huomattiin, etteivät cavityjen väliset tulokset olleetkaan enää yhteneviä keskenään, vaan tuloksista voitiin nähdä eri cavityjen välinen taajuuspoikkeama. Saman koneistuserän väliset poikkeamat olivat suhteellisen pieniä, mutta eri koneistuserien väliset poikkeamat olivat jo merkittäviä tuloksen tarkkuuden kannalta.

Havaitut taajuuspoikkeamat vaikeuttivat tulosten vertailtavuutta eri cavityillä tehtyjen mittausten välillä. Kun uusien tuotteiden vaatimukset kasvoivat, tiukennettiin taajuusvaatimuksia entisestään, mikä aiheutti huomattavia ongelmia valmistukseen.

Ongelmat ilmenevät esimerkiksi siinä vaiheessa, kun mekaniikkatoimittaja on valmistanut resonaattorierän, jonka taajuus pysyttelee toimittajan mittausten mukaan spesifikaation sisällä. Vastaanottava tehdas taas tarkistaa erän ja havaitsee, ettei erä täytäkään vaatimuksia ja palauttaa erän takaisin toimittajalle, joka puolestaan katsoo, että osat ovat vaatimuksenmukaisia.

Edellä mainittua tilannetta ei saisi tapahtua, vaan kaikkien käytössä olevien mitauselementtien olisi toimittava niin, että saadut tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään riittävällä tarkkuudella.

Resonaattoreille asetettu spesifikaatioikkuna on pieni, jotta toimittajat voisivat säätää valmistusprosessinsa mahdollisimman hyvin kuntoon. Kaikkien käytössä olevien mittacavityjen välisten mittausten on oltava yhteneviä, jotta mitatut tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

4 RESONAATTORIN MITTAUSSYSTEEMI

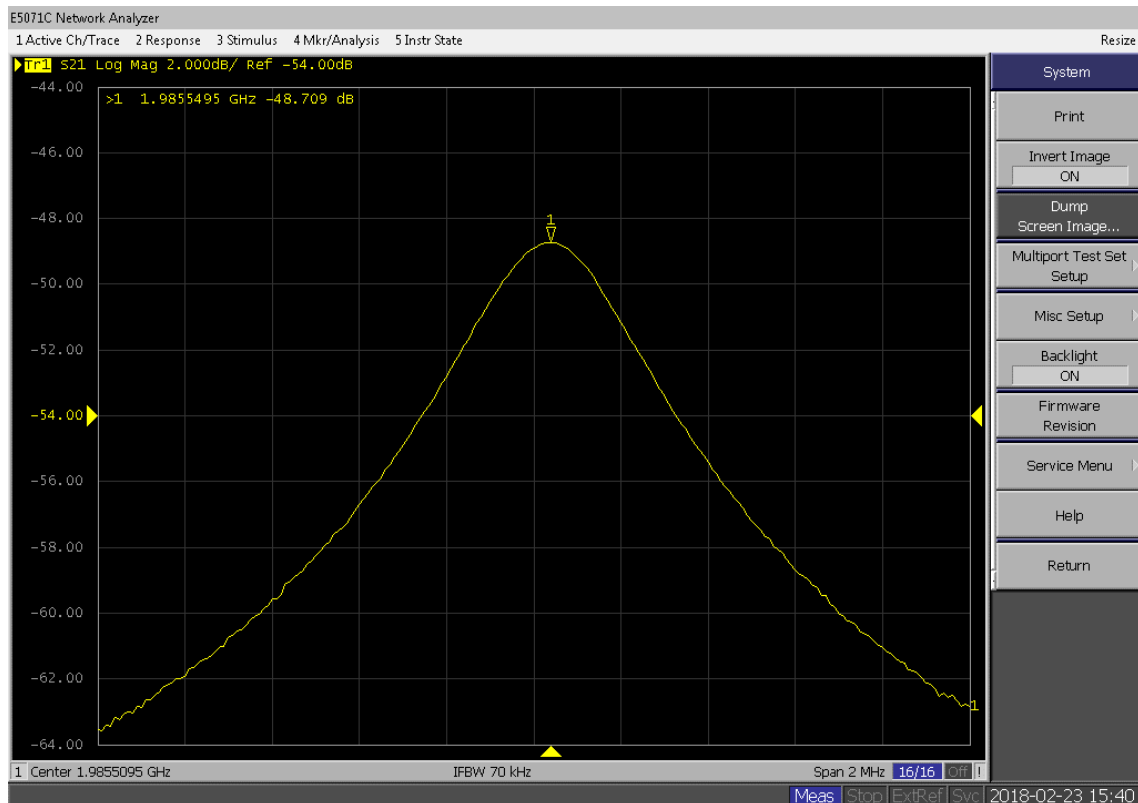
Nykyisellään resonaattoreiden osalta mekaanisiin mittoihin perustuva spesifikaatio on riittämätön, tämän vuoksi on otettu käyttöön lisävaatimus (resonaattorien taajuusmittaus), jolla pyritään varmistamaan resonaattorin toiminta myös automatisoidun viritystavan yhteydessä.

4.1 Resonaattoreiden taajuusmittaus

Taajuusmittaus perustuu resonaattorin resonanssitaajuuteen siihen erityisesti suunnitellussa ympäristössä. Resonaattorin resonanssitaajuutta mitataan mittauselementillä (cavityllä), joka vastaa resonaattorin toimintaympäristöä tukiasemasuodattimessa. Mittauksen avulla varmistetaan tutkittavan resonaattorin vaatimuksenmukaisuus vertaamalla saatua mittatulosta osaspesifiseen taajuusvaatimukseen.

Itse mittauselementti (cavity) koostuu rungosta ja siihen liittyvästä mittauskanasta liittimineen. Kokonaisuus mallintaa resonaattorin tyypillistä ympäristöä tukiasemasuodattimessa. Mittaus suoritetaan kannessa sijaitsevien liittimien kautta. Liittimien kuormitus (Loss) on säädetty niin, että mitattavan resonaattorin ollessa kytkettynä asettuu mittausvaimennus välille (45 – 55dB), tällöin kuormasta johtuvaa mittausvirhettä ei pääse tapahtumaan. Mittaustapana käytetään suoraa läpimittausta ilman erillistä kalibrointia.

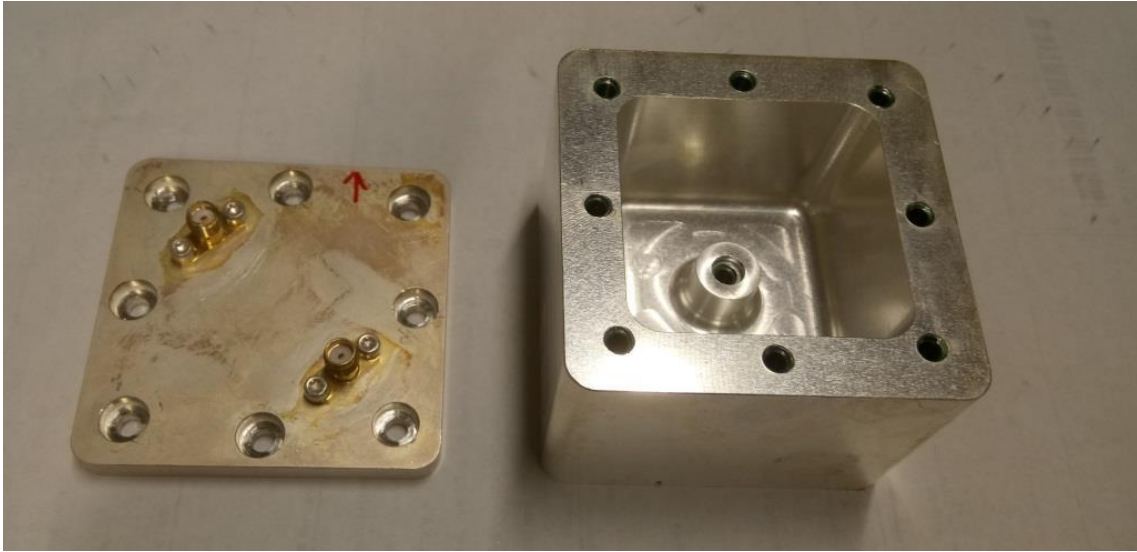
Mitattava resonaattori kiinnitetään cavityssä olevaan resonaattoritorniin tuotekohtaisten mittausohjeiden mukaisesti ja suljetaan kansi kiristämällä kannen kiinnitysruuvit asetettuun momenttiin. Mittauskaapelit kytketään paikoilleen ja valitaan piirianalyysaattorilta resonaattorikohtainen mittausrekisteri. Jos taajuutta ei löydy suoraan näytöltä, on analyysaattorin parametreja muutettava (Span, Center Frequency) osalta niin että resonanssitaajuus saadaan haettua näytön keskelle.



Kuvio 9. Taajuusmittaus, resonanssitaajuus

Saatua mittatulosta verrataan spesifikaatioon. Jos mittatulokset pysyvät taajuus-spesifikaation sisällä, voidaan resonaattorierä hyväksyä. Jos taas mittatulos poikkeaa vaatimuksista, erä hylätään ja palautetaan toimittajalle.

Mittaukset tehdään otantamenetelmällä, jossa on määriteltä eräkohtaiset näyte-koot.



Kuvio 10. Taajuusmittaukseen käytettävä mittacavity sekä kansi

5 VAIHTOEHDOT MITTAUSTAVAN KEHITTÄMISEKSI

Nokialla on tällä hetkellä käytössä mekaanisten mittojen spesifikaation lisäksi myös erillinen taajuusvaatimus lähes kaikille nykyisin tuotannossa oleville resonaattoreille.

Resonaattoreiden valmistus on massatuotantoa, jossa yksilöllisesti valmistetun työkalun avulla valmistetaan resonaattoreita huomattavia määriä kerrallaan. Käytössä olevien resonaattoreiden valmistustyökalujen säädöt perustuvat mekaaniisiin mittavaatimuksiin sekä käytössä oleviin resonaattoreiden mittausta cavityihin.

Uuden mittaustavan tulee olla mahdollisimman samankaltainen nykyisen mittauksen kanssa ja muutosten yksinkertaisia, jotta uuden mittaustavan implementointi voidaan hoitaa nykyisen tuotannon häiriintymättä.

Kaikilla alihankkijoilla sekä valmistavilla tehtailla on käytössään piirianalysaattori resonaattorin taajuusmittausten suorittamista varten. Taajuusmittaukseen käytettävän laitteiston ei tarvitse olla vuosittaisen kalibroinnin piirissä, eikä myöskään erillisiä rekisterikalibrointeja vaadita, koska niillä ei ole vaikutusta taajuusmittauksen tarkkuuteen.

Mahdollisen mittaustavan muutoksen johdosta myös käytössä olevat tuotekohtaiset mittaushjeet joudutaan päivittämään. Muutosten yhteydessä olisi otettava huomioon, ettei merkittäviä muutoksia mittaustapoihin ja käytäntöihin tehtäisi, sillä mittaukset suoritetaan suurelta osin henkilöillä, joilla ei ole teknistä koulutusta. Ohjeiden tulisi olla mahdollisimman selkeät ja yksinkertaiset.

Nykyisin käytettävät mittaohjeet ovat lähes samanlaisia kaikilla tuotteilla. Tavoitteena olisikin löytää mittaustapa, joka toimisi sekä kaikille nykyisille ja tuleville tuotteille. Ylläpidon kannalta yhtenäinen ohjeistus kaikille tuotteille on tavoitettavissa.

5.1 Referenssiin perustuva mittaustapa

Lähtökohtana uudelle mittaustavalle ovat käytettävät referenssit eli tässä yhteydessä Golden cavity, johon suhteutettavien mittausten perusteella voidaan eri mittaelementtien eli cavityjen väliset erot häivyttää. Toisena referenssinä toimii resonaattori, johon eri mittaelementtien välisiä tuloksia verrataan.

Golden cavity toimii yhteisenä referenssinä kaikille käytössä oleville cavityille. Kaikki käytössä olevat cavityt suhteutetaan näyttämään samaa mittaustulosta kuin Golden cavityssä ja poikkeamat on myös kyettävä tarkistamaan myös suorittamalla vertailu Goldenin suhteen.

Nykyisellään käytettävien mittauscavityjen taajuuseroja ei ole otettu huomioon resonaattorien taajuusmittauksissa. Tämä aiheuttaa huomattavaa vaihtelua mittaustuloksissa. Riippuen käytettävästä resonaattorista ja mittacavitystä voivat eri mittalokaatioiden väliset erot olla niin suuria, että häiritsevät mittausten tulkintaa ja pienentävät tarkkuutta.

Oletetaan että eri lokaatioissa käytettävien mittacavityjen välinen taajuuspoikkeama on 4 MHz samalla resonaattorilla. Speksi resonaattorille on (820 – 830 MHz). Toimittajan tarkistusmittauksen tulos on 829 MHz, joka on hyväksytty. Vastaanottavan tehtaan mittaustulos samalla resonaattorilla on taas 833 MHz. Tämän mittauksen mukaan tulos on hylätty. Tämän tilanteen vuoksi vastaanotettava tehdas lähettää resonaattorierän takaisin toimittajalle, joka puolestaan toteaa tilanteen olevan kunnossa. Kumpikin toimija on osaltaan oikeassa, mutta resonaattorien käytettävyydestä ei voida todeta mitään ennen käytännön testejä itse suodattimessa. Tilanne on erittäin hankala, sillä käytännössä kaikille mittauksille tarvitaan referenssi, jonka avulla mittaukset voidaan kalibroida suhteessa Goldeniin ja sitä kautta häivyttää mittausvirheet.

Mittacavityt voidaan suhteuttaa toisiinsa referenssielementeillä eli resonaattoreilla, joiden avulla tehdään vertailumittaukset eri cavityjen välillä. Säättämällä mittacavity referenssiresonaattorin avulla vastaamaan Golden Cavityn taajuutta tai suhteuttamaan mittaukset muilla tavoin referenssin avulla saadaan eri mittauscavityillä tehdyt mittaukset vertailukelpoisiksi keskenään.

Riippuen käytettävästä mittaustavasta on itse spesifikaation muotoa mahdollisesti muutettava. Jos cavityjen keskinäistä taajuusvirhettä ei voida kompensoida tavanomaisella suoralla mittaustavalla, on spesifikaatiota muutettava vastaamaan käytettävää mittaustapaa.

5.2 Suora mittaus

Mitattaessa resonaattoria suoraan annettua spesifikaatiota vasten, verrataan saatua mittatulosta annettuun spesifikaatioon esim. (820 – 830 MHz), jos tulos asettuu halutun taajuusikkunan sisään, voidaan mittaustulos hyväksyä, muussa tapauksessa mittatulos on hylätty.

5.3 Vertaileva mittaus

Vertailtavan mittauksen tapauksessa saatua mittatulosta ei voida tulkita suoraan speksiä vasten, vaan tulkinta tulee taajuussiirtymän suuruudesta suhteessa referenssiresonaattoriin esim. $(f(x) \text{ MHz } \pm 5 \text{ MHz})$. Jos esimerkiksi referenssiresonaattori, johon mittaukset suhteutetaan, mittatulos on (822 MHz) ja spesifikaatio on $(f(x) \text{ MHz } \pm 5 \text{ MHz})$ eli hyväksyttävä taajuusikkuna on (822 MHz \pm 5 MHz) eli (817 – 827 MHz). Jos vertailtavan resonaattorin mitattu taajuus on taajuusikkunan sisällä, niin mittaus on hyväksytty, muussa tapauksessa hylätty.

6 REFERENSSIRESONAATTORIEN VALMISTUS

Jotta mittaukset voitaisiin suhteuttaa resonaattoreihin, jotka samalla toimisivat monistettavina referensseinä, olisi kyettävä valmistamaan mekaanisesti tarkoin samanlaisia resonaattoreita.

Päätettiin valmistaa kaksi erää resonaattoreita koneistamalla eri valmistusmenetelmillä. Tarkoituksena testata koneistamalla valmistettujen resonaattorien soveltuvuus referenssiresonaattoreiksi ja samalla tutkia sekä simuloinnilla saavutettua tarkkuutta ja eri koneistusmenetelmien eroavaisuuksia valmistustarkkuuksissa.

Koska vetämismenetelmällä (Deep Drawn) valmistettujen resonaattorien geometria voi muuttua kiinnityskertojen myötä, kulumisen taikka mekaanisen vaurion vuoksi, on järkevää tehdä resonaattorit koneistamalla, jolloin saavutetaan jäykkä rakenne ja riittävät seinämäpaksuudet suhteessa vetämismenetelmään. Tällä tavoin voidaan vähentää eri kiristyskertojen mahdollisesti aiheuttamaa geometrian muuttumista ja taajuuserojen syntymistä. Koneistuksella voidaan yleensä toistaa muodot varsin hyvällä tarkkuudella, kun käytetään samaa materiaalierää ja samaa koneistusasettelua koko valmistuserälle.

Jotta resonaattoreita kyettäisiin käyttämään referenssielementteinä, oli valmistetun erän sisällä olevien resonaattoreiden taajuuspoikkeamien oltava mahdollisimman pieniä, jotta taajuuden vaihteluista johtuva virhe saataisiin minimoitua.

Resonaattoreita valmistettiin kaksi erää käyttäen eri valmistusmenetelmiä, muodot suunniteltiin pelkistetyksi, toistettavuuden optimoimiseksi. Tarkoitus oli selvittää, kuinka suureen valmistustarkkuuteen päästään ja onko ylipäättään mahdollista valmistaa resonaattoreita koneistamalla riittävän tarkasti pitäen erän taajuusvaihtelut niin pieninä, että niiden käyttö useina rinnakkaisina, keskenään vertailtavina referenssielementteinä on mahdollista.

Resonaattorit simuloitiin mallinetussa mittaympäristössä (Cavityssä), taajuus pyrittiin saamaan Käytetyn malliresonaattorin ominaistaajuudelle mittacavityssä, käytetyn resonaattorin speksi cavityssä on (1969 -1983MHz). Tarkoitus oli myös

testata, millaisella tarkkuudella voidaan simulaation perusteella valmistaa alkuperäisestä muodosta poikkeava mutta taajuudeltaan spesifikaatiota (1969 – 1983 MHz) vastaava resonaattori.



Kuvio 11. Malliresonaattori, toimii referenssinä simuloitaville resonaattoreille

Ensimmäisenä mallina oli sienityyppinen resonaattori (Mushroom type), jota käytetään yleisesti matalien taajuuksien suodattimissa. Koneistettu yksinkertaistettu malli simuloitiin suoraan malliresonaattorin pohjalta, samaa resonaattorityyppiä käytettiin myös vertailuresonaattorina testeissä.



Kuvio 12. Tyypillinen sienimallin resonaattori

Toiseksi malliksi valittiin putkiresonaattori, joka koetettiin myös saada simuloimalla malliresonaattorin taajuusikkunaan (1969 – 1983 MHz). Valmistustapana käytettiin koneistusta ja tarkkuushiontaa. Tarkkuushionnalla pyrittiin minimoimaan mekaanisten mittojen vaihtelu valmistetun erän sisällä.



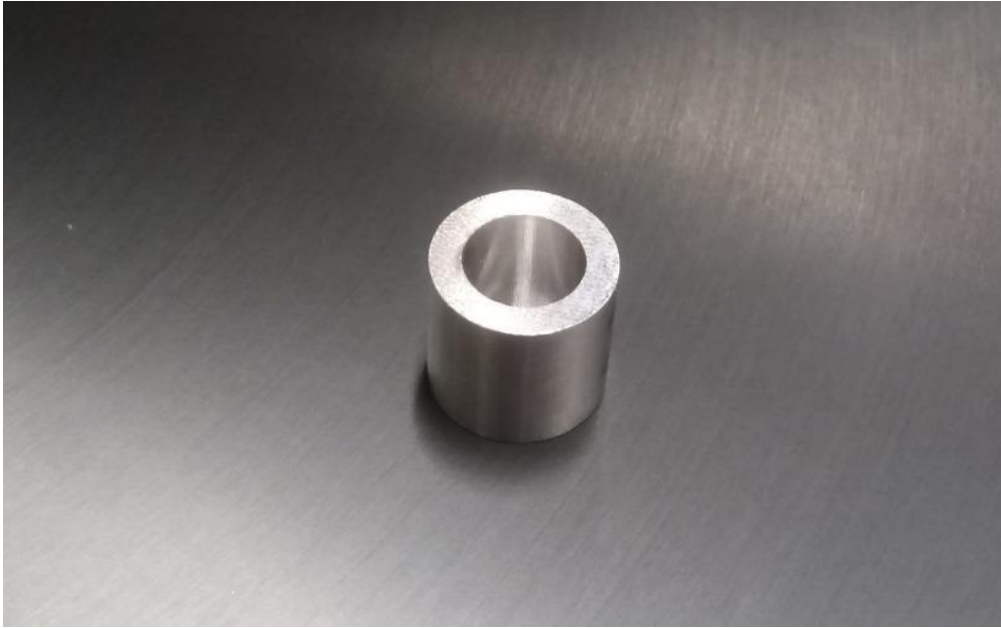
Kuvio 13. Tyypillinen putkimallin resonaattori

Kumpaakin resonaattorin mallia valmistettiin kymmenen kappaleen erä. Resonaattoreiden mallit olivat pelkistettyjä, jotta valmistusprosessista saatiin tehtyä mahdollisimman yksinkertainen.

Koneistuserien valmistumisen jälkeen resonaattorit testattiin ja selvitettiin valmistusmenetelmän soveltuvuus referenssiresonaattoreiden valmistukseen. Samalla tutkittiin simulointiohjelmiston mallinnuksen soveltuvuutta tarkkoihin taajuusvaatimuksiin, tarkassa mittaympäristössä.



Kuvio 14. Koneistettu sieniresonaattori



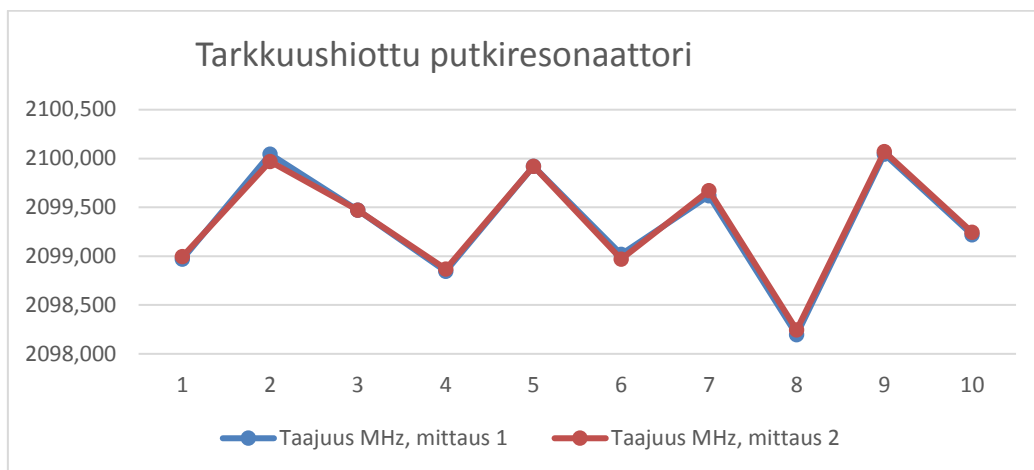
Kuvio 14. Koneistettu ja tarkkuushiottu putkiresonaattori

6.1 Protoresonaattoreiden testaus

Koneistuserien valmistumisen jälkeen resonaattorit mitattiin mittacavityssä kahden kertaan. Tarkasteltiin erien välistä hajontaa, taajuuspoikkeamaa suhteessa (FRGY) resonaattoriin sekä toistuvuutta eri kiinnityskertojen välillä.

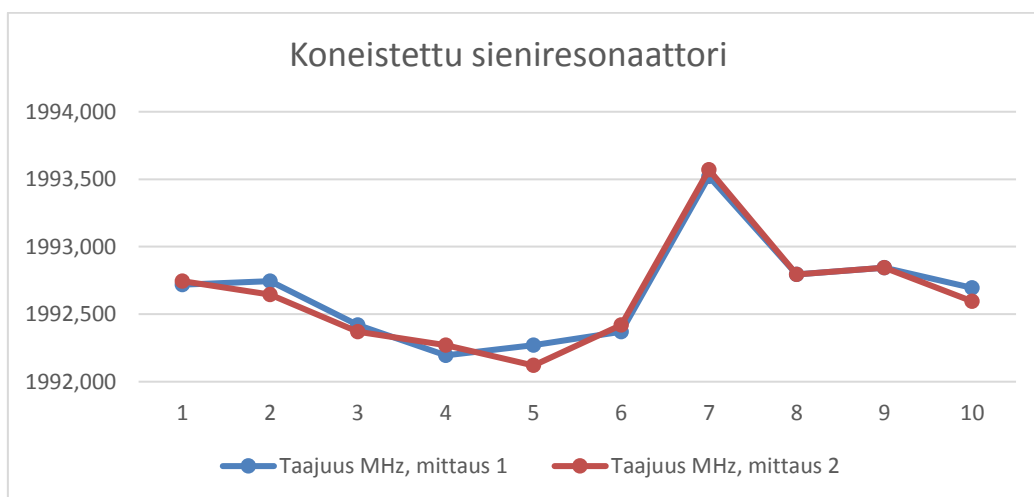
Valmistettujen resonaattorierien sisällä resonaattoreiden väliset taajuuspoikkeamat olivat liian suuria käytettäväksi sellaisenaan referenssiresonaattoreina. Toisaalta koneistetun resonaattorin kiinnitysten välinen tarkkuus toistui hyvänä, saavutettu 200KHz virhe on pieni verrattaessa syvävetämällä valmistettujen resonaattoreiden toistotarkkuuksiin (liite1).

Tarkkuushiotussa erässä resonaattoreiden väliset taajuuserot olivat suurempia mutta, kiinnityskertojen välinen taajuuspoikkeama toistui pienempänä kuin normaalisti koneistetuilla resonaattoreilla.



Kuvio 16. Koneistetun putkiresonaattorin toistuvuus

Normaalisti koneistetussa erässä taas resonaattoreiden välinen taajuuspoikkeama on pienempi, mutta mittauskertojen väliset erot ovat suurempia.



Kuvio 17. Koneistetun sieniresonaattorin toistuvuus

Simuloinnin taajuuspoikkeama suhteessa malliresonaattoriin oli sieniresonaattorin kohdalla 17 MHz ja putkiresonaattorin tapauksessa 124 MHz. Näyttäisikin siltä, että resonaattorin muodon poikkeama suhteessa malliresonaattoriin vaikuttaa huomattavasti taajuuteen, eikä simuloimalla voida suoraan päästä haluttuun tarkkuuteen. Käytännössä tämä tarkoittaa useita optimointikertoja, joka vaikeuttaa ja hankaloittaa referenssiresonaattorien valmistusta.

Resonaattorit valmistettiin mahdollisimman huolellisesti, kiinnittäen huomiota tarkkuuteen ja samalla testaten tarkkuushiontaa mittojen optimoimiseksi. Lopputulokset ei kuitenkaan ollut odotusten mukainen toistettavuuden osalta, sillä hajonta oli liian suurta. Normaalilla valmistusprosessilla tehtäessä olisi taajuusjakauma todennäköisesti vielä mitattua suurempaa, minkä vuoksi toimivan referenssisarjan valmistaminen olisi erittäin haastavaa ja vaikeaa.

Jotta koneistettuja resonaattorieriä voitaisiin käyttää referenssielementteinä, hyväksyttävissä oleva poikkeama voisi olla maksimissaan noin 500KHz luokkaa, tarkkuuden liikaa kärsimättä.

7 TAAJUUSSÄÄTÖINEN KANSI

Taajuussäätöisen kannen toiminta perustuu olettamukseen, että on mahdollista valmistaa resonaattorisarja tarkasti samalle taajuusalueelle. Valmistettuja resonaattoreita voidaan käyttää rinnakkaisina referenssielementteinä, kun erän keskinäinen taajuusvaihtelu on niin pientä, ettei sillä ole merkitystä itse mittauksen tarkkuuteen.

Tällöin käytössä olisi sarja resonaattoreita, joiden avulla jokaisen cavityn mittatulos voitaisiin suhteuttaa referenssiresonaattorin taajuuteen Golden cavityssä säätämällä viritettävää mittakantta tasaten cavityjen väliset taajuuserot.

Käytännössä referenssiresonaattori olisi kyettävä simuloimaan ja valmistamaan niin tarkasti, että sen resonanssitaajuus asettuisi Golden cavityssä keskelle spesifikaatiota ja toimisi monistettavana referenssielementtinä. Tällöin jokaisen cavityn mukana pitäisi kulkea referenssiresonaattori, jonka mukaan mittakansi säädettäisiin virittämällä cavityn taajuus spesifikaation mukaiseksi.

Kun referenssiresonaattorin taajuus Golden cavityssä tiedetään, voidaan muut käytössä olevat cavityt säätää säätökannen avulla halutulle taajuudelle ja verrata referenssiresonaattorin taajuuseroa suhteessa tarkistettavaan resonaattoriin, spesifikaationa täytyy käyttää vertailevan mittauksen mallia, joka on muotoa: $(f(x)MHz \pm 5MHz)$.

Säädettävää mittakantta voidaan käyttää myös kiinteällä säädöllä säätämällä virityskannen laboratoriossa Golden cavityn suhteen referenssiresonaattorin avulla. Tämä toteutetaan mittaamalla referenssiresonaattori Golden cavityssä, jonka jälkeen mitataan sama resonaattori verifioitavassa cavityssä ja säädetään taajuus samaksi viritysruihin avulla. Lopuksi kansi lukitaan suojakotelolla, varmistaen ettei säätöä voi muuttaa enää kannen lukitsemisen jälkeen.

7.1 Taajuussäätöisen kannen valmistus ja testaus

Päätettiin testata taajuussäätöistä kantta testicavityssä, jonka tuloksia verrataan suoraan mittaukseen kiinteällä kannella samassa mittacavityssä. Säädetävän kannen toiminta perustuu siihen, että kannen viritysruuvin avulla voidaan säätää taajuus aina samaksi kuin Golden cavityn taajuus. Oletuksena on, että säätökannella varustetun mittacavityn toiminta taajuusmuutoksen suhteen on samanlainen kuin kiinteällä (normaali) kannella, mutta tämä oli asia, joka vaati käytännön testausta asian varmistamiseksi.

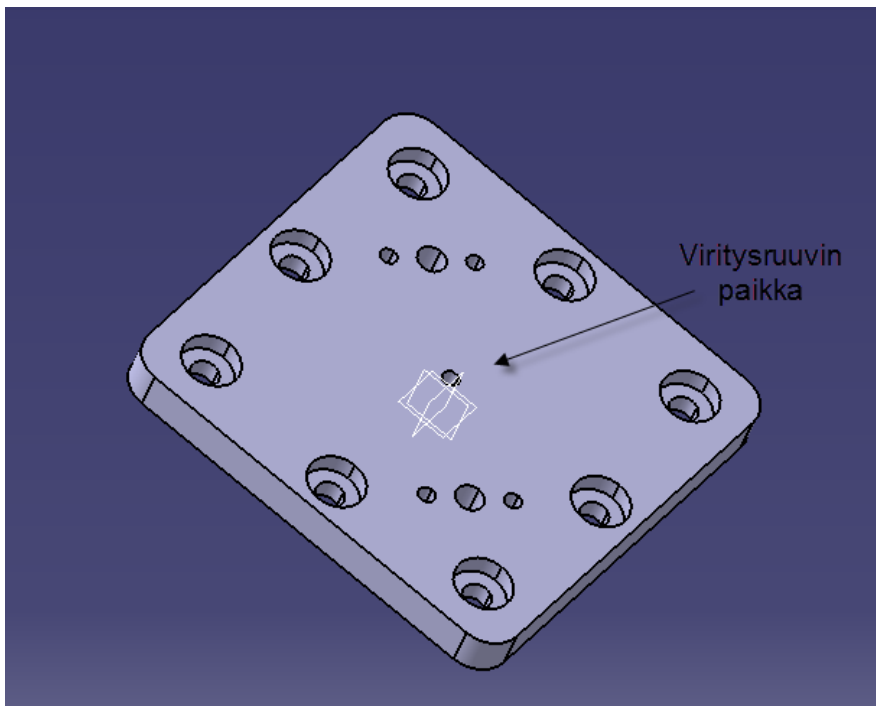
7.2 Mittauscavityn sekä virityskannen toiminta

Resonaattorin ollessa mittacavityssä resonanssitaajuus muodostuu resonaattorin kytkennästä ympäröiviin pintoihin kuten kanteen, sivuseiniin ja pohjaan. Itse mittakanteen on kiinnitetty kaksi liitintä, joiden välinen vaimennus (Loss) käytettäessä mitattavaa resonaattoria on säädetty ($-45 - / -55\text{dB}$) välille, tällöin vaimennuksen taso on oikea ja mittausta häiritsevää kohinaa ei synny eikä kytkentä ole liian voimakas aiheuttaakseen mittausvirhettä.

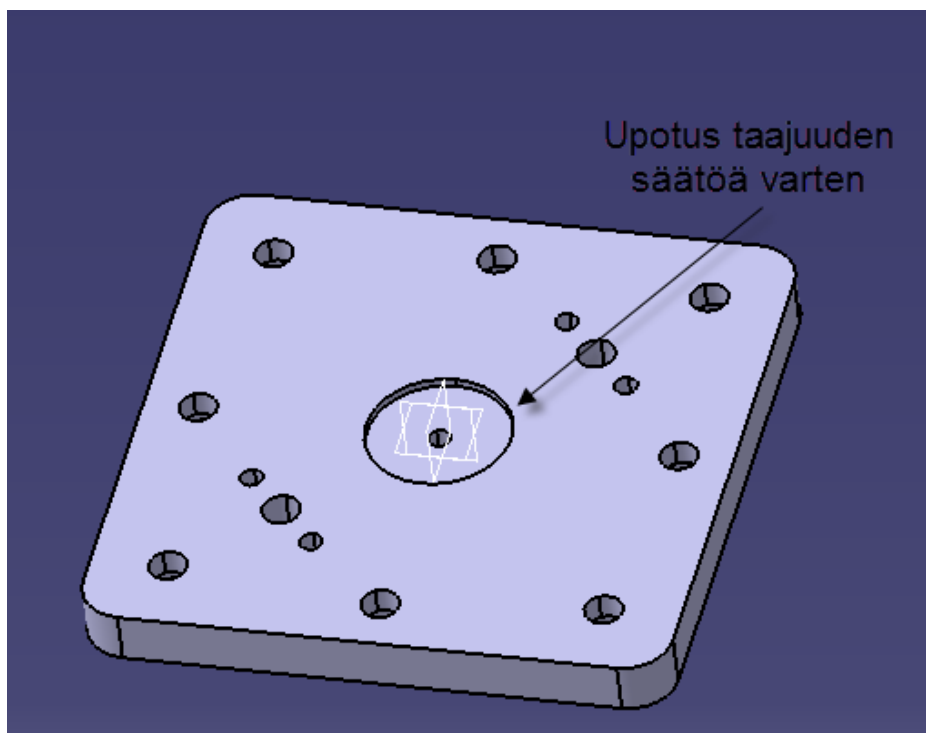
Mittaustapana on suora läpimittaus (S_{12} tai S_{21}), jolloin toinen analysaattorin portti lähettää signaalia ja toinen vastaanottaa. Resonanssitaajuus, joka muodostuu resonaattorin ja mittacavityn yhteisvaikutuksesta, voidaan mitata piirianalysaattorilla (Network Analyzer), säätämällä eri parametreja niin että mitattava taajuus saadaan rajattua oikeassa suhteessa näytölle.

Jotta resonanssitaajuutta voidaan säätää, on mittacavityn kanteen lisättävä viritysruuvi, jota säätämällä voidaan resonaattorin kannen ja resonaattorin välistä kytkentää vahvistaa ja saada resonanssitaajuutta alaspäin. Lisäksi toimivan säätöikkunan mahdollistamiseksi perustaajuutta on saatava ylöspäin kiinteän cavityn suhteen, sillä viritysruuvilla on mahdollista säätää pelkästään taajuutta alaspäin. Tämän voi toteuttaa koneistamalla kanteen resonaattorin yläpuolelle alueen, joka lisää kannen sekä resonaattorin ilmaväliä ja siirtää cavityn perustaajuutta ylöspäin.

Kannesta tehtiin alustava suunnitelma sekä piirrettiin koneistusta varten tarvittavat mekaniikkakuvat. Virityssruuviksi valittiin suora messingistä valmistettu M3 virityssruuvi (DIN551), joka tarvitsee erillisen lukitusmutterin. Virityssruuvien paikka sijoitettiin keskelle cavityn kantta resonaattorin yläpuolelle (kuvio 18). Taajuuden ylöspäin säädön mahdollistamiseksi, tehtiin kannen alapintaan 1 mm syvyinen ja 16 mm leveä pyöreä alue kanteen saman keskeisesti virityssruuvien kanssa (kuvio 19).



Kuvio 18. Virityssruuvien sijoitus

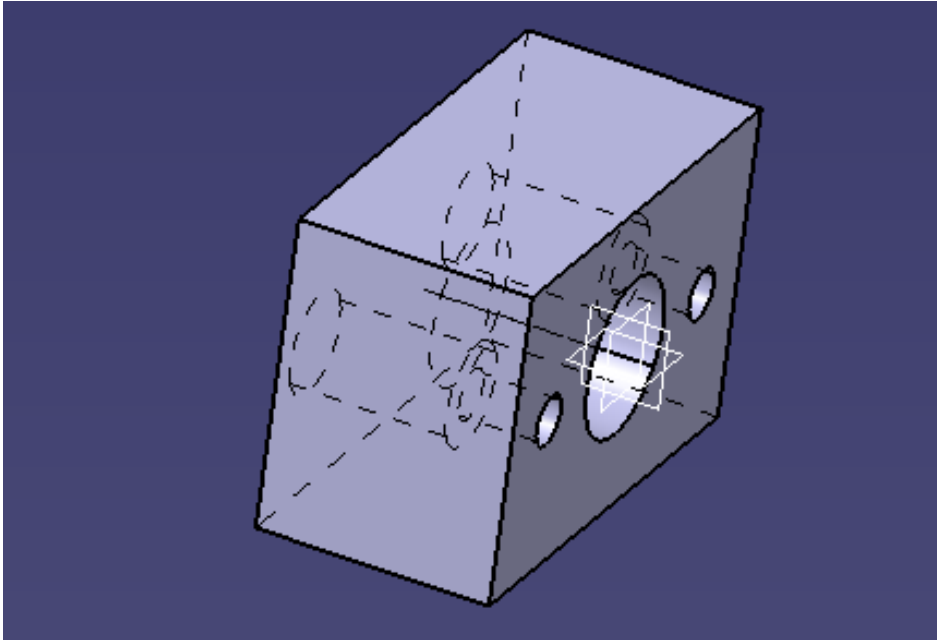


Kuvio 19. Taajuuden säätöä varten tehty upotus

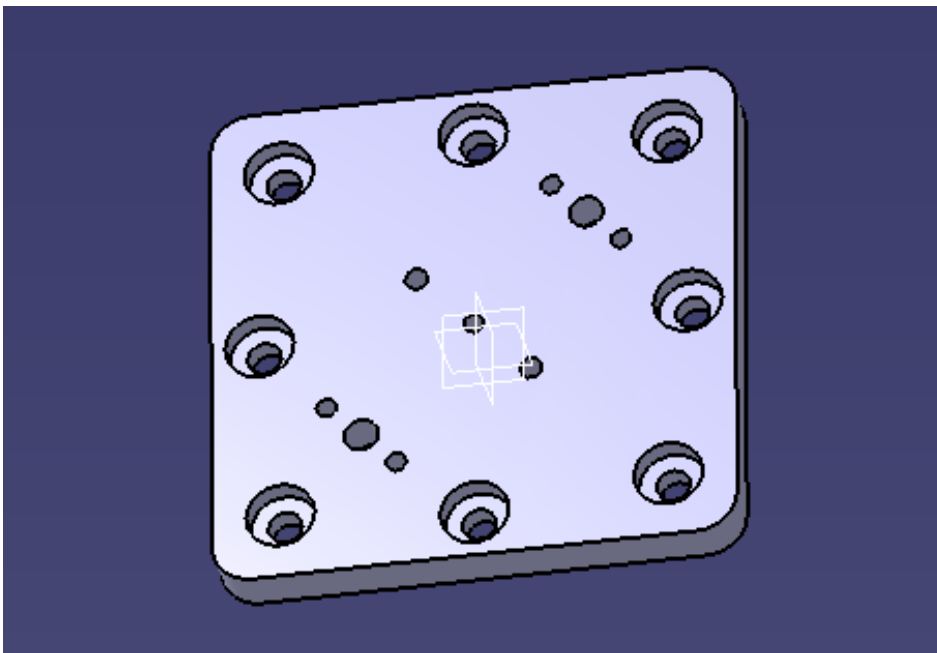
Kansi valmistettiin mekaniikkakuvan mukaisesti. Mittaliittimet asennettiin paikoilleen ja säädettiin vaimennus (Loss) oikealle tasolle. Valmistetulle kannelle tehtiin alustavat testaukset, jossa tarkistettiin ruuvien säätöalue sekä kannen toiminta. Testien mukaan kansi toimi tarkoituksenmukaisesti ja sitä voitiin käyttää testeihin sellaisenaan ilman muutoksia.

7.3 Mittauskannen lukitus

Lisäksi kanteen suunniteltiin erillinen suojakotelo, jolla viritysruuvi voidaan sientöidä säädön jälkeen (kuvio 20) sekä muokattiin mekaniikkakuvia niin, että lisättiin kotelolle kiinnitysreiät kanteen kiinnitystä varten (kuvio 21).



Kuvio 20. Suojakotelo viritysruuville



Kuvio 21. Lisätty kotelon kiinnitysreiät

7.4 Testaus

Testin tarkoitus oli testata säädettävän kannen mittatarkkuutta suhteessa kiinteään alkuperäiseen kanteen. Testissä tutkittiin, millaisella tarkkuudella säädettävällä kannella varustettu mittacavity seuraa kiinteällä kannella varustetun cavityn taajuuksia. Vertailun cavityt olivat muuten samanlaisia, mutta säätökansien geometria poikkeaa kiinteästä kannesta alapinnan osalta, jossa on koneistettu syvennys.

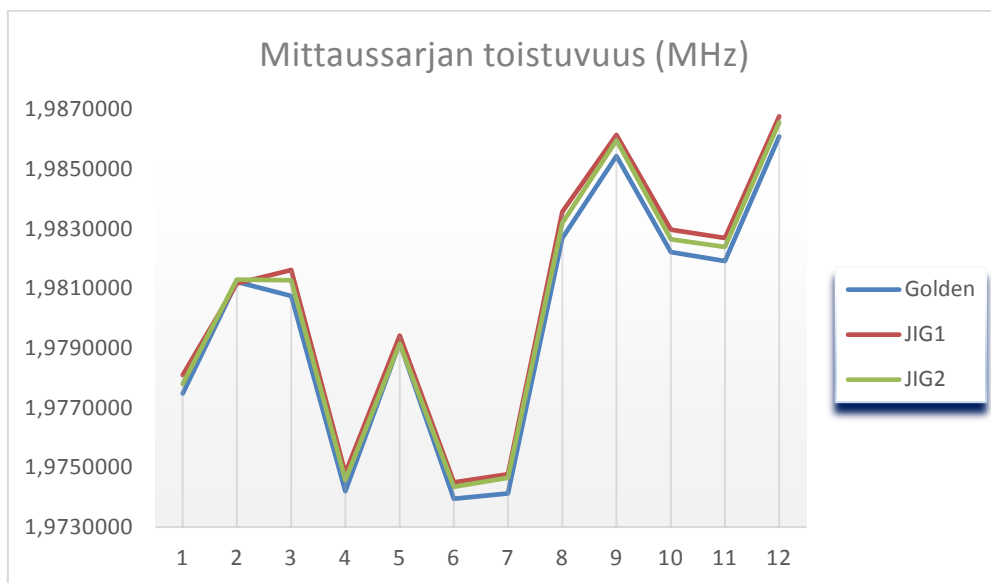
Testeissä käytettiin kahta säätökannella varustettua mittacavityä sekä koneistettuja referenssiresonaattoreita. Tuloksia verrattiin Golden cavityn tuloksiin. Vertailtavien cavityjen taajuudet säädettiin referenssiresonaattorien avulla samaksi kuin Golden cavityssä.

Säätötyön jälkeen 12 resonaattorin sarja mitattiin ensin Golden cavityssä ja sen jälkeen vertailtavissa cavityissä. Vertailtavien cavityjen tuloksia verrattiin Golden cavityn tuloksiin ja laskettiin resonaattorikohtaiset taajuuserot suhteessa Goldeniin.

Resonaattoreiden kiinnityksellä tiedettiin olevan vaikutusta mittatarkkuuteen: joten testin aikana kiinnitettiin erityistä huomiota resonaattoreiden kiinnitykseen.

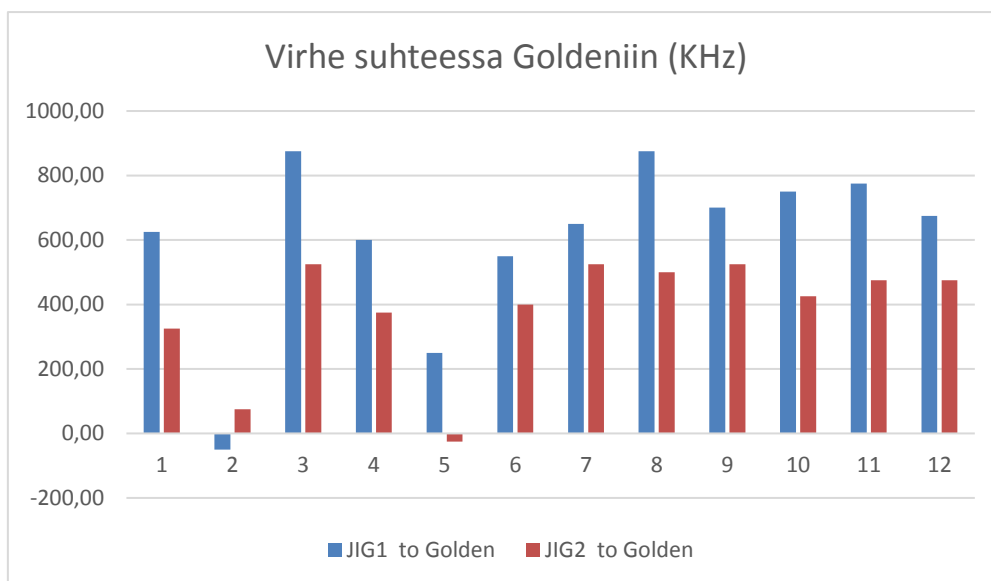
7.5 Tulokset

Säätökansilla mitattujen resonaattorien taajuudet toistuivat hyvin kiinteäsäätöisen Goldenin suhteen, mutta resonaattorien kiinnitys aiheutti epäsäännönmukaisuutta tuloksiin.



Kuvio 22. Resonaattorien toistuvuus Goldenin suhteen

Suuruudeltaan säätökansilla saatujen virheet eivät muodostuneet liian suuriksi. Kokonaisuutena saavutettu mittatarkkuus suhteessa Golden cavityyn oli noin (1 MHz).



Kuvio 23. Säätökansien kokonaisvirhe suhteessa Golden Cavityyn

Ongelmana tässä mittaustavassa on virityskannen säätö, joka epäonnistuessaan aiheuttaa tuloksiin säännönmukaisen virheen, kuten Cavityn 1 kohdalla nähdään

(liite 2). Kiinnityksestä aiheutuvaa virhettä ei voi vertailevalla mittaustavalla poistaa mitenkään, mutta kiinnittämällä huomiota kiinnitykseen saadaan virhettä vähennettyä huomattavasti.

Oli käytötapana sitten vertaileva mittaus Golden-resonaattoriin tai lukittu kansi, mittatarkkuus on sama. Säättötoimenpide itsessään sekä resonaattorin kiinnitys lisäävät virheen suuruutta. Viritysruuvien säädön lukituksen pysyvyyttä ei testattu. Oletettavasti kansi kestää rajallisesti kolhuja säädön muuttumatta, ja aika ajoin säätö olisi tarkistettava joka tapauksessa.

8 KIINTEÄ KANSI

Säädettävän kannen käyttäminen mittacavityjen taajuuserojen häivyttämiseen vaatii säätötyön, spesifikaation ja työohjeiden muokkauksen, mahdollisen kannen lukitsemisen sekä cavitykohtaisen referenssiresonaattorin. Tämä ei ole helppo ratkaisu, koska resonaattoreita valmistetaan useiden eri valmistajien toimesta ja tarkistusmittauksia joudutaan tekemään useilla eri toimittajilla sekä valmistavilla tehtailla. Mahdollisen mittaustavan muutoksen yhteydessä kaikki mittaushjeet olisi päivitettävä. Kaikki mittaussoperaattorit olisi myös koulutettava uuteen mittaustapaan.

Säädettävän kannen avulla eri cavityjen väliset erot olisivat kalibroitavissa, mutta tämä vaatisi varsin suuria muutoksia mittaussjärjestelyihin. Tämän vuoksi koettiin etsiä myös toista ratkaisua ongelmaan.

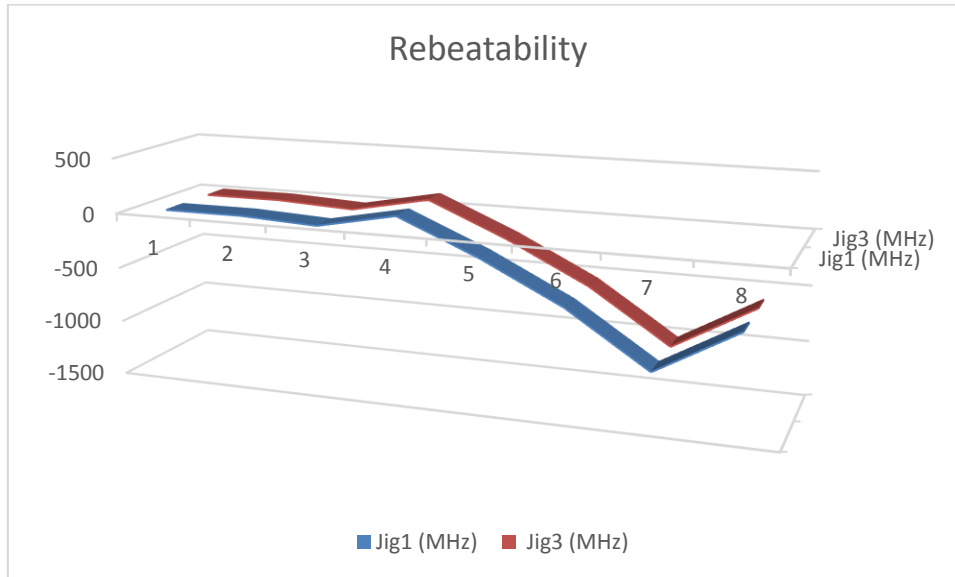
Kannen säädettävyys auttaa sovittamaan cavityn taajuuden samaksi kuin Golden cavityssä. Mittaustapaa voisi kuitenkin käyttää myös ilman kannen säätöä, mittaamalla resonaattorikohtaisen taajuuspoikkeaman Golden cavityn ja suhteutettavan cavityn välillä.

8.1 Suhteellinen taajuusvirhe kahden eri cavityn välillä

Tutkittiin kahden eri koneistuserästä valitun cavityn käyttäytymistä taajuuden suhteen mittaamalla kummassakin cavityssä erilaisia resonaattoripareja ja vertaamalla mitattujen resonaattoriparien taajuuksia sekä resonaattoreiden että cavityjen välillä.

Mittaukseen valittiin kaksi mittacavityä, joiden välinen taajuusero oli merkittävä sekä kahdeksan erityyppistä vertailuresonaattoria, joita verrattiin sekä sienimallin että suoran mallin koneistettuihin referenssiresonaattoreihin. Vertailussa käytettiin erimallisia referenssiresonaattoreita samalla tutkien referenssin muodon ja taajuuden vaikutusta suhteessa vertailtavaan resonaattoriin.

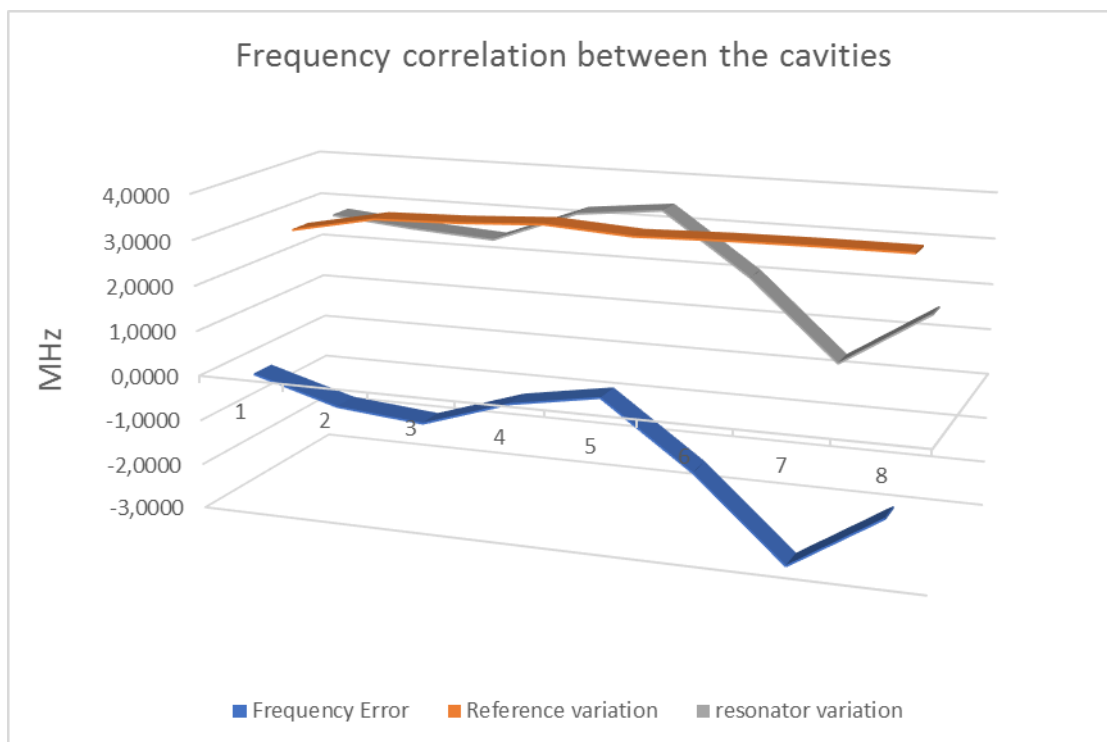
Mitattaessa toistettavuutta eri cavityjen välillä tuloksissa ei ole huomattavia eroja, vaan cavityjen väliset mittaerot pysyvät erittäin hyvin hallinnassa. Suurin mittausero muodostui vertailuresonaattoreiden kiinnityksestä johtuvasta vaihtelusta (liite3).



Kuvio 24. Resonaattoriparin taajuuksien erotus cavityjen välillä

Cavityjen välinen taajuuspoikkeama ei korreloi vertailtavien resonaattoriparien taajuuseron suhteen, vaan mittaukset seuraavat toisiaan hyvin tarkasti. Jos vertailuresonaattorien kiinnityksen aiheuttama poikkeama lasketaan pois, toistettavuus on hyvä.

Alla olevassa kuviossa on seurattu taajuuspoikkeamaa cavityjen suhteen referenssiresonaattorien sekä vertailuresonaattorien välillä, suhteessa kokonaismittausvirheeseen. Taulukosta voidaan nähdä, että referenssiresonaattorien mitattu taajuusero cavityjen välillä pysyy tarkasti samana (reference variation), vertailuresonaattorien mitattu taajuusero cavityjen välillä (resonator variation) on suurempi ja mittausten välinen virhe (frequency error) korreloi suoraan kokonaismittausvirheen (frequency error) suhteen.



Kuvio 25. Cavityjen välinen mittaero eri tekijöiden suhteen

Resonaattorin kiinnitys sekä valmistustavan vaikutus toistuvuuteen kiinnityskertojen välillä tekee poikkeamia mittaustuloksiin. Testissä ei ole kiinnitetty erityistä huomiota resonaattoreiden kiinnityksen tarkkuuteen vaan kaikissa mittauksissa on seurattu vakioimuotoisen mittausohjeen määrittelyä.

Muussa suhteessa taajuuspoikkeama mitattujen resonaattorien välillä on pieni, cavityjen välinen taajuusero ei vaikuta virheen suuruuteen. Suurimmat virheet syntyvät resonaattoreiden kiinnityksistä. Vertailuresonaattoreiden suuri taajuuspoikkeama suhteessa referenssiresonaattoriin näkyy myös virheen suurenemisena. Koneistetun resonaattorin käyttö referenssiresonaattorina on suositeltavaa, koska kiinnitysten välinen taajuusvirhe on pieni.

8.2 Referenssiresonaattorin keskiarvoistus ja cavityjen toistuvuus

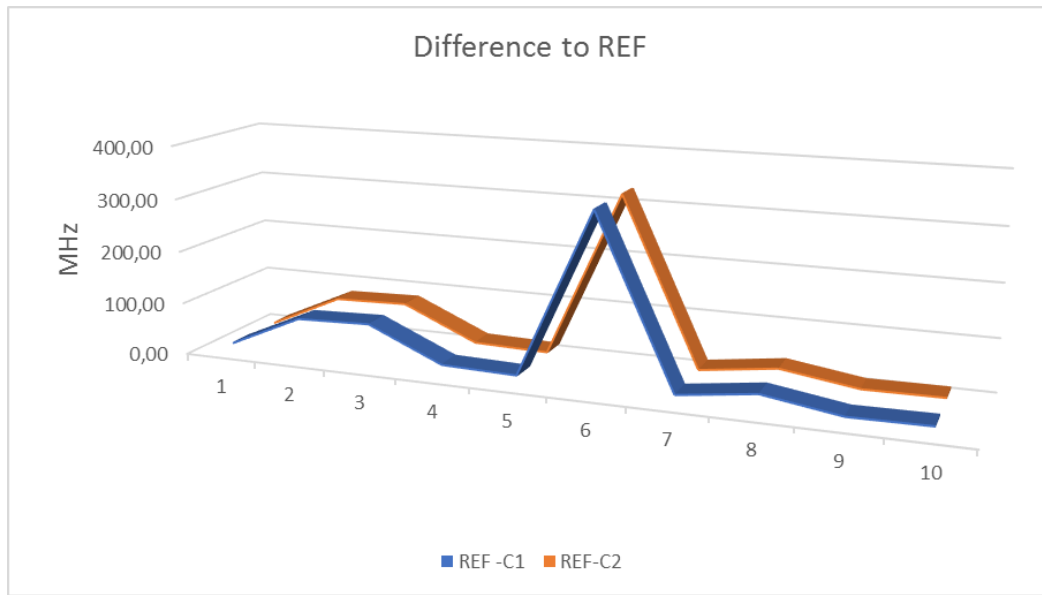
Selvittääksemme referenssiresonaattoreiden toimintaa edelleen sekä taajuuden vaikutusta mittatarkkuuteen tehtiin uusi testi. Käytettiin kahta taajuudeltaan poikkeavaa cavityä. Kummallekin valittiin oma referenssiresonaattori ja laskettiin cavitykohtaiset referenssitaajuudet keskiarvottamalla kolmen perättäisen mittauksen perusteella: alla olevan kaavan mukaan.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Laskettuja referenssitaajuuksia verrattiin mitattujen resonaattoreiden mittatuloksiin laskemalla sekä referenssien sekä mittausten välinen erotus cavityjen välillä. Lopuksi verrattiin saatuja virheitä referenssitaajuuksien erotukseen ja tarkasteltiin mittausten hajontaa.

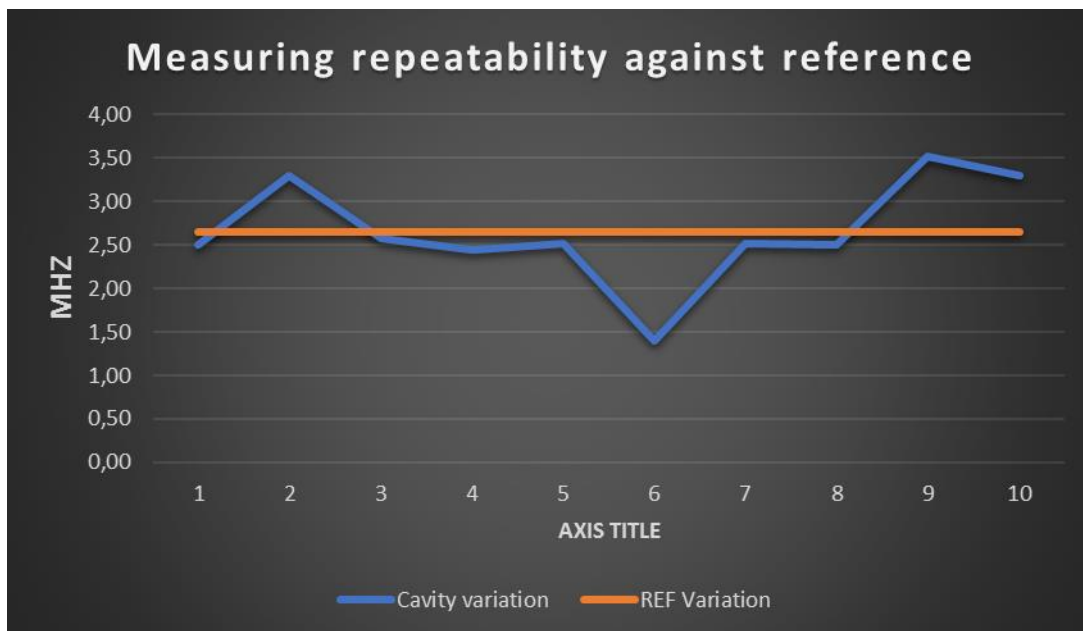
Testiin käytetyt resonaattorit valittiin samalta taajuusalueelta, poikkeuksena resonaattori 6, joka valittiin mukaan nähdäksemme, vaikuttaako taajuusero referenssi ja vertailuresonaattorin välillä tarkkuuteen.

Taulukossa 5 tarkasteltiin mittausten toistuvuutta referenssitaajuuksien sekä mittausten välisten erotuksien suhteen. Mittausten toistuvuus on hyvä, cavitykohtaiset taajuuden erotukset seurasivat toisiaan tarkasti. Mittauksessa resonaattorin 6 taajuusero referenssitaajuuteen on muita suurempi.



Kuvio 26. Resonaattoreiden taajuuserot Referenssivakioihin

Kuviossa 27 tarkasteltiin mitattujen resonaattorien taajuuseroa suhteessa referenssitaajuuksiin, jossa oranssi jana on referenssitaajuuksien erotus (2,65 MHz) ja sininen jana on mitattujen resonaattorien erotus vertailtavien cavityjen välillä. Mittauksissa on hajontaa referenssitaaajuuden molemmin puolin.

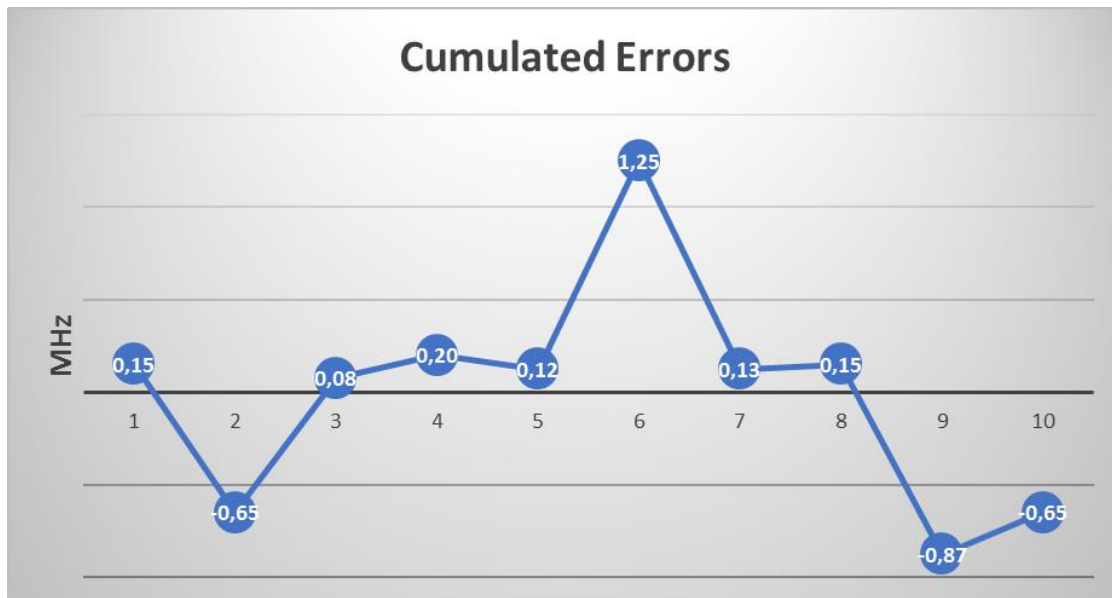


Kuvio 27. Cavityjen välinen erotus suhteessa referenssitaajuuksien erotukseen

Mittauksen virhe liittyy resonaattorin kiinnitykseen, kuten todettiin myös testattaessa samaa resonaattoria useaan kertaan samassa cavityssä. Tämän vuoksi resonaattori on pyrittävä kiinnittämään aina samalla tavalla.

Taulukossa 7 tarkastellaan mittauksen kokonaisvirhettä, jonka hajonta on mitaussarjalla levinnyt nollan kummallekin puolelle, mittaepätarkkuus on noin ($\pm 1 \text{ MHz}$).

Suurin yksittäinen mittausrvirhe oli resonaattorilla, jonka taajuuspoikkeama suhteessa referenssiresonaattoriin oli suuri. Jätettäessä poikkeavan resonaattorin tulos huomiotta paranee mittatarkkuus arvoon ($\pm 500 \text{ KHz}$).



Kuvio 28. Kertautuneet virheet

Testissä käytetyt resonaattorit olivat summittaisesti valittuja, kiinnitystapana seurattiin mittausohjeen kiinnitysmäärittelyä sekä momenttia ja nähtiin kiinnityksen sekä taajuuseron vaikutus mittatarkkuuteen karkealla tasolla. Referenssiresonaattorien taajuusero oli lähes vakio, jos kiinnityksestä aiheutuneet virheet siivotaan pois (liite 3).

Referenssiresonaattorin keskiarvottaminen on suositeltava keino saada yksittäisestä mittauksesta johtuvia virheitä pienennettyä. Usean peräkkäisen mittauksen tulosten ollessa yhtenäisiä, voidaan todeta kiinnitystavan olevan riittävän tarkka.

Laskemalla eri mittausten välinen keskiarvo, saadaan myös vertailumittausta referenssiresonaattorin suhteen tarkennettua.

9 SUHTEELLINEN MITTAUSTAPA

Tehtyjen testien perusteella mittaero cavityjen välillä pysyy vakiona referenssiresonaattorien suhteen taajuuseroista huolimatta. Aiemmat testaukset ovat perustuneet cavitykohtaisiin referenssiresonaattoreihin ja vertaileviin mittauksiin cavityjen välillä.

Koska taajuusero cavityjen välillä on ollut lähes vakio referenssiresonaattorin taajuudesta huolimatta, voidaan päätellä, ettei cavityn mukana kulkevaa referenssiresonaattoria tarvita vaan cavityt voisi suhteuttaa toisiinsa erillisen kertoimen avulla.

Mittaustavan etuna olisi, ettei mittacavityn mukana tarvitsisi olla Golden resonaattoria, eikä myöskään erillisiä säätötoimenpiteitä tarvittaisi. Käytännössä cavityihin lisättäisiin yksilöllinen korjauskerroin, jonka avulla laskemalla mittaustulokset voidaan suhteuttaa toisiinsa.

Oletus testattiin käytännössä mittaamalla sama referenssiresonaattori kahdessa eri cavityssä ja laskemalla (kerroin), jakamalla mitatut resonanssitaajuudet keskenään. Tulokseksi saatiin kerroin, jota käytettiin taajuuden korjaamiseen. Pikaisen testauksen perusteella idea toimi, joten sitä lähdettiin tutkimaan edelleen.

9.1 Suoran ja suhteellisen mittaustavan vertailu

Suhteellisen mittaustavan toiminnan selvittämiseksi tehtiin testi missä käytettiin referenssinä yhtä koneistettua resonaattoria sekä kahta cavityä, josta toinen nimettiin Golden cavityksi. Mitattiin sama referenssiresonaattori kummassakin cavityssä, kirjattiin taajuudet ylös ja käytettiin mitattuja taajuuksia vertailuluvun (CF-factor) muodostamiseen.

Kerroin laskettiin jakamalla Golden cavityssä saatu taajuus vertailtavan cavityn(X) taajuudella.

$$CF\ factor = \frac{f\ (Golden\)}{f(x)}$$

Tuloksena kerroin jota käyttämällä vertailtavan cavityn taajuuden tulisi asettua hyvin lähelle Golden cavityn taajuutta. Kertoimesta käytetään nimitystä CF-factor.

Koska suhdeluku asettuu lähelle lukua yksi ja kerrottavan luvun ollessa suuri, on kertoimessa oltava riittävästi desimaaleja, jotta tarkkuus ei kärsi. Desimaalit rajattiin kahdeksaan virheen minimoimiseksi. Vertailtavan cavityn taajuus saadaan ratkaistua kertomalla vertailtavan cavityn (x) taajuus lasketulla suhdeluvulla.

$$f(\text{Golden}) = \text{CFfactor} * f(x)$$

Kerroin laskettiin ja tehtiin tarkistus kaavan sekä virheiden suhteen Excel-taulukolla (kuvio 29), jossa jaettiin Golden cavityssä mitatun referenssiresonaattorin taajuus vertailucavityn taajuudella. Laskettiin kerroin ja tarkistettiin korjattu taajuus. Korjattua taajuutta verrattiin alkuperäiseen Goldenissa mitattuun taajuuteen, jos tulosten erotus on nolla, kerroin toimii oikein.

REF in Golden				
Golden Jig	1,9765500			
	REF in Jig1	CF-factor	freq * CF	Difference to Golden
JIG1	1,9741750	1,00120303	1,9765500	0,00

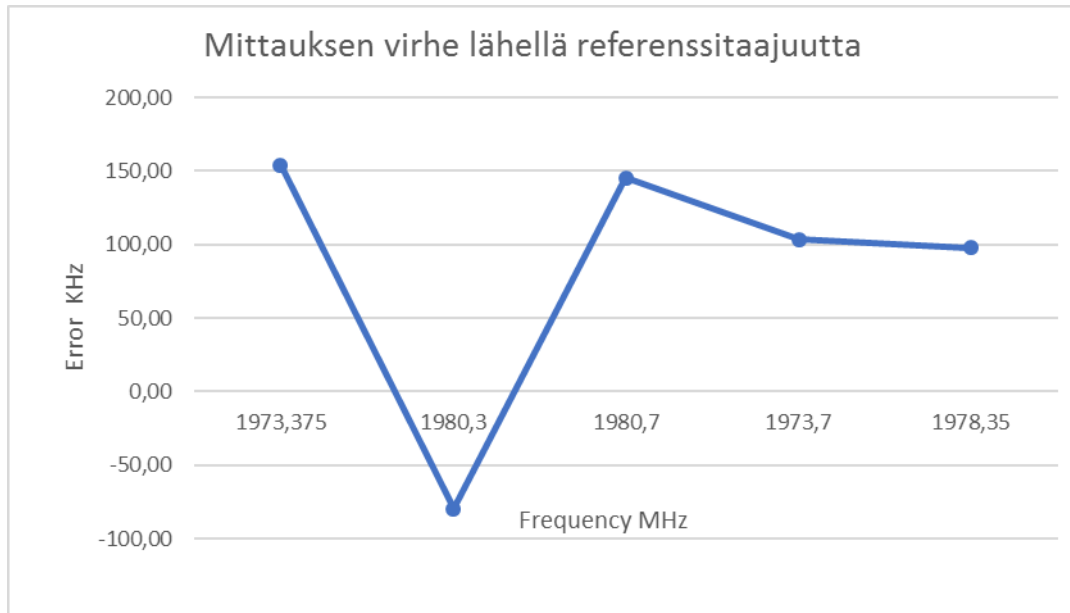
Kuvio 29. CF-kertoimen laskenta taulukko

Testattavat resonaattorit jaettiin kahteen eri ryhmään, toiseen ryhmään valittiin resonaattoreita, joiden taajuus on lähellä referenssiresonaattoreita ja toiseen ryhmään valittiin resonaattoreita eri taajuuksilta, siten että noin (1000 MHz) levyinen taajuuskaista oli edustettuna mahdollisimman tasaisin välein. Resonaattoreiden kiinnitykseen tehtiin huolella, jotta kiinnityksen aiheuttama virhe saataisiin mahdollisimman pieneksi.

9.2 Mittaussarja lähellä referenssitaajuutta

Resonaattorisarjan mittauksiin tehtiin Excel-taulukko, jonka avulla laskenta tehtiin suoraan mittauksen jälkeen, merkitsemällä mitatut taajuudet ylös taulukkoon. Taulukosta voitiin lukea Golden- sekä vertailu cavityjen taajuudet mitatulla resonaattorilla, korjauskerroin, korjattu taajuus sekä mittausten välinen poikkeama (liite4).

Resonaattorit lähellä referenssitaajuutta toistuivat hyvin tarkasti keskenään, käytännössä mitattujen resonaattorien perusteella virhe on erittäin pieni ja ei juurikaan poikkea suoran mittauksen tuloksista. Saavutettu mittatarkkuus ($\pm 250\text{KHz}$) menee käytännössä kiinnitysten aiheuttamien epätarkkuuksien sisään.

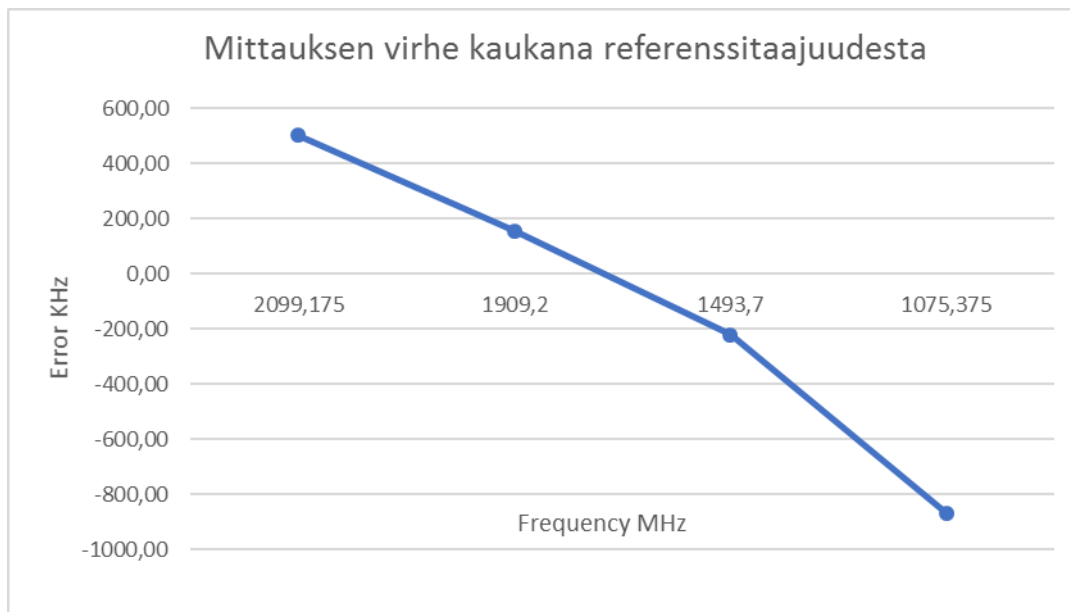


Kuvio 30. Virheen kumuloituminen lähellä referenssitaajuutta.

9.3 Mittasarja kaukana referenssitaajuudesta

Testijärjestely sekä mittataulukko olivat samoja kuin aiemmassa testissä, joka tehtiin lähellä referenssitaajuutta oleville resonaattoreille. Nyt mukaan valikoitiin taajuudeltaan huomattavasti referenssistä poikkeavia resonaattoreita, niin että valikoidulla sarjalla voidaan muodostaa otos mahdollisimman laajalta taajuusalueelta, tässä tapauksessa (2,1 - 1 GHz), joka kattaa enemmän kuin cavityssä normaalisti käytettävän taajuusalueen.

Mitattujen resonaattorien virheen suuruus näyttäisi testin perusteella olevan suoraan verrannollinen taajuuden poikkeamaan referenssitaajuudesta. Mittausten tulokseksi saatiin lähes suora jana jonka virhe kasvaa taajuuseron funktiona. Epävarmuustekijänä on myös resonaattorin kiinnitysten aiheuttama virhe, mutta siitä huolimatta trendi on selvä ja tukee aiempia testejä, jossa huomattiin mittaustaajuuden eron referenssitaajuuteen aiheuttavan virheen kasvamista tuloksissa.



Kuvio 31. Virheen kumuloituminen kaukana referenssitaajuudesta

Valitut taajuudet edustivat laajaa taajuusikkunaa. Mitatut taajuuserot referenssiin vaikuttivat selkeästi virheen muodostumiseen: mitä kauempana mitattava resonaattori on vertailutaajuudesta, sitä suuremmaksi kasvaa virhe. Käytännössä kuitenkin saman mallista cavityä käytetään resonaattoreilla, jotka poikkeavat enimmillään (500 MHz) referenssitaajuudesta, joten tässä tapauksessa virheen suuruusluokka olisi alle (± 1 MHz). Virheen suuruus jopa taajuuden ääripäissä ei muodostunut merkittäväksi, vaikka cavityn kalibrointiin käytetty referenssiresonaattori poikkesi suuresti mittasarjasta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että käytettävillä taajuuksilla cavityä voidaan käyttää yhden korjaus kertoimen mukaan kaikilla resonaattoreiden taajuusvarianteilla.

9.4 Suhteellisen mittaustavan tarkkuus

Tähänastisten testien perusteella korjauskerrointa käytettäessä päästään parempaan tarkkuuteen kuin vertailumittauksella, sillä kiinteää kerrointa käytettäessä kiinnityksen aiheuttama mittausrvirhe pienenee, vertailumittauksen jäädessä pois. Tärkeää on kuitenkin, että kerrointa laskiessa verifioidaan tulos tarkistusmittauksien avulla ja varmistetaan kertoimen toimivuus.

Ennen mittaustavan valintaa tehtiin lisätestaus suhteellisen mittaustavan tarkkuuden varmistamiseksi. Testiin valittiin kolme mittacavityä, joiden taajuudet poikkesivat toisistaan. Kaikille cavityille valittiin taajuuksiltaan poikkeavat vakiotyyppiset referenssiresonaattorit koneistettujen sijaan. Resonaattoreita käytettiin kertoimen laskentaan mittaamalla referenssiresonaattorit Golden cavityssä, että vertailucavityssä ja laskemalla mittausten perusteella kiinteä CF-kerroin jokaiselle cavitylle (kuvio 32).

CF factor calculation

Resonators	Golden freq	JIG1 freq	JIG2 freq	JIG3 freq	CF to JIG1	CF to JIG2	CF to JIG3
REF1	1,958350	1,958525			0,999911		
REF2	1,993875		1,991300			1,001293	
REF3	1,992550			1,988625			1,001974

Kuvio 32. Korjauskertoimen laskeminen cavity kohtaisesti

Mittaukseen valittiin 12 kappaleen erä saman tyyppisiä resonaattoreita eri tuotantoeristä, edustaen saman tuotteen resonaattoreita spesifikaation sisällä. Kaikissa vertailtavissa cavityissä mitattiin sama resonaattorisarja, jonka jälkeen tarkasteltiin mittausten hajontaa eri cavityjen kesken sekä muodostunutta kokonaisvirhettä. Mittauksissa kiinnitettiin erityistä huomiota kiinnitykseen ja tehtiin tarkistusmittaukset korjauskertoimen laskennassa, varmistaen kertoimen toiminnan (liite 4).

9.5 Testin tulokset

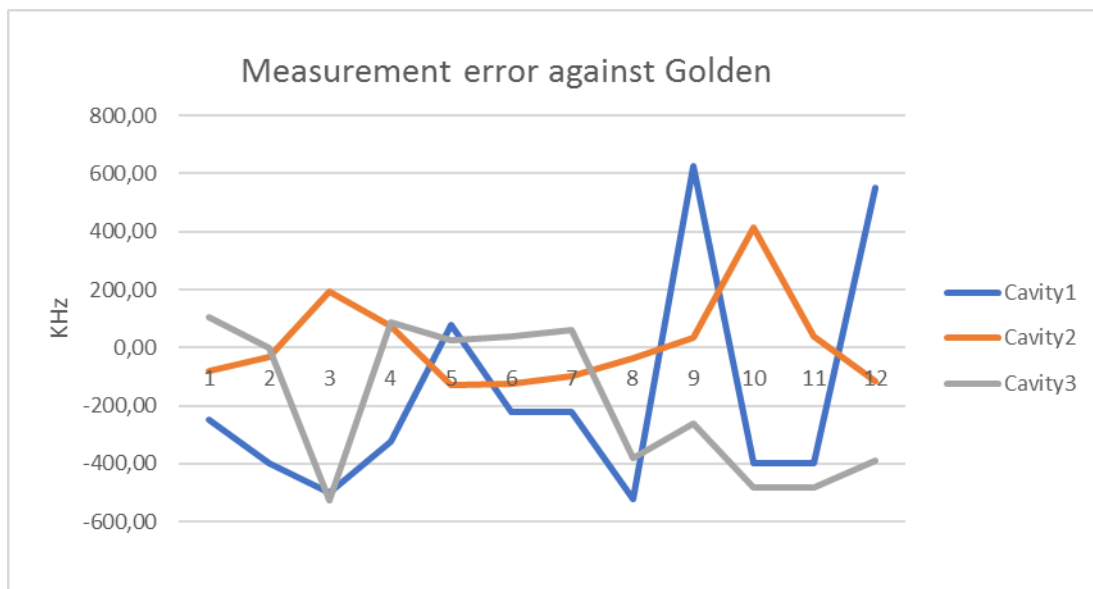
Mittaukset toistuivat tarkkuudeltaan hyvin. Vaikka kaikilla cavityillä oli eri korjauskerroin, mittauksen kokonaisvirheet jakautuivat tasaisesti. Tulosten vaihtelu johtui suurelta osin resonaattoreiden kiinnityksien epätarkkuuksista eri mittauskertojen välillä. Koska kaikkia saatuja mittatuloksia verrattiin testin aikana resonaattoreiden suoriin mittauksiin Golden cavityssä, näkyy myös Golden cavityyn kiinnityksen aiheuttama virhe tuloksissa. Todellinen mittaustarkkuus asettui $\pm 550 \text{ KHz}$ arvoon, joka on hyväksyttävällä tasolla.

Taulukossa 10 on tarkasteltu kokonaismittavirheen jakautumista eri cavityjen kesken. Eniten hajontaa mittauksissa yksittäisten kiinnityksien välillä on cavityssä

(1), mittausvirheet ovat suurelta osin aiheutuneet kiinnityksestä, koska tulosten jakauma on tasainen.

Tasaisimmin mittatulokset jakautuivat (cavity 2) osalta. Taajuudet toistuivat hyvin eri kiinnityskertojen välillä, josta voidaan päätellä kertoimen laskennan onnistuneen hyvin, myös kiinnitysten välinen virhe on myös pieni.

Cavity 3 mittatuloksissa kiinnityskertojen väliset virheet ovat pieniä, mutta tuloksien jakauma ei ole tasainen. Tämä johtuu resonaattorin kiinnityksestä aiheutuneesta epätarkkuudesta, kertoimen laskennan yhteydessä. Tämä aiheuttaa säännönmukaisen virheen mittauksissa. Suuruusluokaltaan virhe oli merkityksellön, mutta kertoo tarpeesta käyttää koneistettuja referenssiresonaattoreita ja kiinnittää erityistä huomiota tarkistusmittauksiin korjauskerrointa laskettaessa.

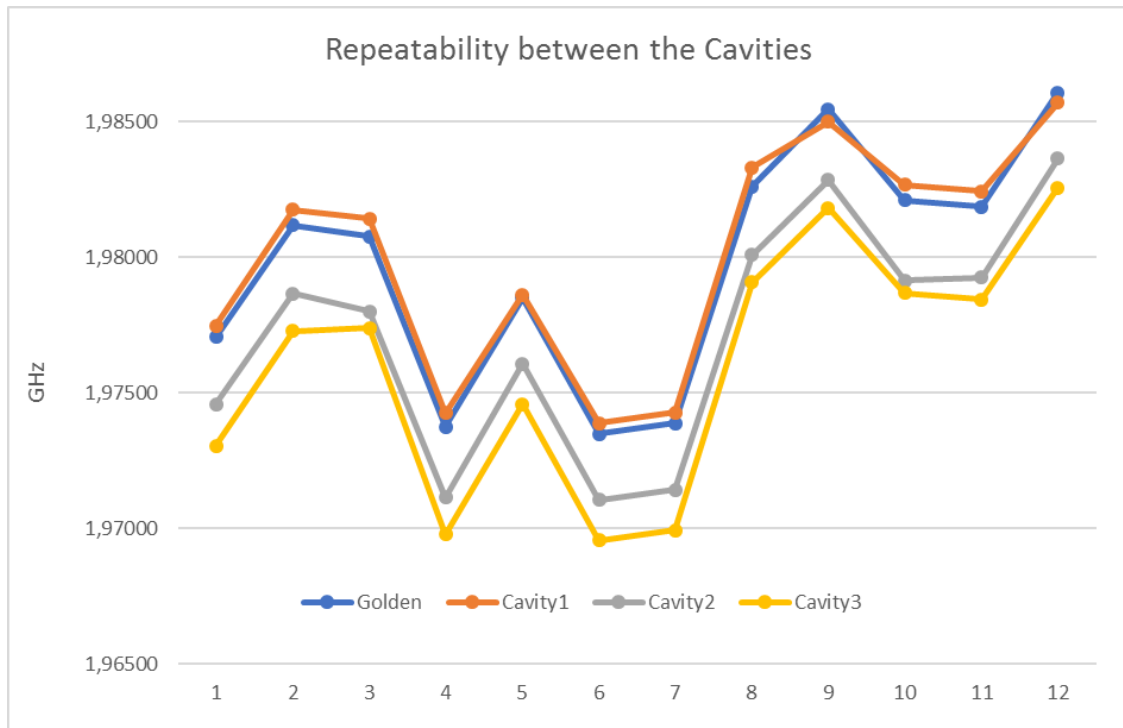


Kuvio 33. Mittausten hajonta cavityjen välillä

Verrattaessa suhteellisen mittaustavan tulosta suoraan Golden cavityn mittauksiin, näkyy mittaustarkkuudessa myös resonaattorin Golden cavityyn kiinnittämisen vaikutus. On huomattava, että testissä käytetyt referenssiresonaattorit olivat normaaleja tuotantoresonaattoreita. Koneistetuilla saavutetaan parempi toistettavuus eri toistokertojen välillä ja siten tarkempi laskenta kertoimelle.

Taulukossa 12 tarkastellaan vertailtavien cavityjen välistä taajuuseroa suhteessa Golden cavityyn. Taajuudeltaan cavity1 sattui lähimmäksi Golden cavityn taajuutta, mutta toistuvuudessa tämä ei näkynyt mitenkään.

Toistuvuus oli hyvä kaikilla cavityillä, mutta tuloksia heikentää kahdesta eri mitaukserrasta kumuloitunut virhe. Cavityjen välisellä taajuuserolla ei ole vaikutusta kertoimen laskentaan taikka toimintaan (Liite5)



Kuvio 34. Mittausten toistuvuus cavityjen välillä

10 VALITTU PARANNUSVAIHTOEHTO

Kun testit oli tehty, pidettiin palaveri eri sidosryhmien kesken ja katselmoitiin tulokset. Uusi menetelmä haluttiin käyttöön nopeasti, sillä uusien tuotteiden taajuusspesifikaatio oli tiukka ja mittausten tuloksinassa oli ongelmia.

10.1 Valitun mallin toteutus sekä implementointi

Taajuusmittausta säädettävällä kannella ei kannatettu, koska toteutus vaatisi erillisen koulutuksen sekä mittaushyöjeiden muutoksen. Myöskin säätötoimenpide itessään lisää epätarkkuutta mittauksiin, lisäksi epätarkkuuden suuruus on riippuvainen operaattorin huolellisuudesta.

Säädettävän kannen käyttö lukittuna ei myöskään saanut kannatusta. Vaikka kansi voidaan säätää ja lukita laboratoriossa suojakotelolla, on säädön muuttaminen säädön jälkeen mahdollista. Viritysruuvi on mekaanisesti kannen alapinnalla ja herkkä kolhuille ja säädön muuttumiselle. Lukittavan kannen käyttö ei myöskään muuta sitä tosiasiaa, että spesifikaation muotoa olisi muutettava vastaamaan mittaustapaa eli säätö tehtäisiin speksin keskitaajuudelta määrätyn taajuussiirtymän verran alaspäin taikka ylöspäin taajuudessa ollen muotoa:

$$f(x)MHz \pm 5MHz$$

Spezifikaation muutos vaatisi uudelleen koulutuksen sekä työohjeiden muutoksen ja saattaisi aiheuttaa tulkintaongelmia mittaustulosten suhteen. Lisäksi, kuten kaikki säädettävät laitteistot olisi lukitun säätökannen oltava säännöllisen tarkistuksen piirissä ja tarkistuksen suorittaminen vaatisi ammattitaitoisen operaattorin, joka voisi sen tehdä.

Jos käytettäisiin vertailevaa mittausta suoraan referenssiresonaattoria vastaan, olisi käytössä oltava riittävän tarkasti monistettavat referenssiresonaattorit, joita ei koe-erän perusteella kyetty valmistamaan riittävällä tarkkuudella, vaikka käytettävissä olivat teknisesti laadukkaat valmistusmenetelmät.

Päätettiin ottaa käyttöön suhteellinen mittaustapa. Moni seikka puolsi menetelmän käyttöönottoa. Implementointi on helppoa, sillä taajuusmittaus itsessään pysyy samanlaisena kuin ennenkin. Lisäksi täytyi vain ottaa käyttöön erillinen kerroin, jota käyttämällä voitiin laskennan jälkeen mittaustulosta verrata suoraan nykyiseen käytössä olevaan spesifikaatioon muuttamatta merkintätapaa mitenkään.

11 YHTEENVETO

Mittaustapa otettiin käyttöön vaiheittain, siten että uusi menetelmä implementoitiin välittömästi tuotteille, joiden spesifikaatio oli haastava. Tuotteilla, joiden kanssa ei ongelmia ollut, jatkettiin vanhalla tarkistusmenetelmällä muuttamatta ohjeita tai cavityjä. Muutos uudempaan järjestelmään tehdään siinä vaiheessa, kun vanhalle tuotteelle uusitaan mittacavity, samalla päivitetään myös mitausohje.

Työohjeen päivitys hoidettiin päivittämällä nykyinen malliohje (Template) yhteistyössä tuotekehityksen kanssa.

Template on mallipohja, jonka pohjalta kaikki tuotannon työohjeet tehdään, tämä mahdollistaa yhdenmukaiset ohjeet helpottaen sekä operaattoreita että suunnittelijoita. Sillä usean samantapaisen, mutta kuitenkin erilaisen ohjeen sijaan, voidaan tuottaa rinnakkaisille tuotteille yhdenmukainen ja selkeä ulkoasu välttäen virheitä. Tämä helpottaa tuotannon työskentelyä sekä ylläpitoa, sillä usean rinnakkaisen tuotteen ohjeistuksen ollessa samankaltainen, on ohje helpompi sisäistää.

Lopulliseen versioon lisättiin ylimääräinen sivu, jossa oli malliesimerkki kertoimen käytöstä. Lisäksi ohjeeseen lisättiin maininta, että kertoimen puuttuessa voidaan se jättää huomiotta. Tällöin myös vanhojen mittacavityjen käyttö onnistuu rinnan uudenmallisen ohjeen kanssa.

11.1 Kertoimen käyttö

Vaikka taajuusmittaus sekä kertoimen laskeminen ovat helppoja, voi siinä myös epäonnistua. Jos kerroin on laskettu väärin, se huonontaa tarkkuutta. On myös mahdollista jakaa cavityjen taajuudet väärinpäin, jolloin laskettu kerroin erojen tasaamisen sijaan lisää cavityjen välistä taajuusvirhettä. Jos kertoimen laskentaan tehtäviin mittauksiin käytetään normaalilla valmistustavalla tehtyä (Deep Drawn) resonaattoria, kiinnityksen aiheuttama vaihtelu huonontaa tarkkuutta. Koneistetun resonaattorin paremman toistotarkkuuden vuoksi on syytä käyttää ainoistaan koneistettuja resonaattoreita kertoimen laskennassa.

Käytännössä kerroin on aina tarkistettava sen laskemisen jälkeen. Tämä tehdään mittaamalla muita resonaattoreita vertailucavityssä ja korjaamalla mitatut taajuu-
det lasketulla (CF-factor) kertoimella. Kertoimella korjattua taajuutta verrataan suoriin Golden cavityn mittauksiin samoilla resonaattoreilla. Tuloksien ollessa keskenään yhteneviä voidaan cavityn kertoimen katsoa olevan oikea.

11.2 Taulukon käyttö kertoimen laskennassa

Jotta cavityjen kertoimen laskennan pystyisi tekemään aina samalla tavoin, oli järkevää suunnitella taulukkopohja, joka ohjaa tekemään säädöt aina samalla tavalla ja lopuksi verifioimaan lasketun kertoimen tarkistusmittauksilla.

Taulukko tehtiin Excel muotoon, jokainen cavity jolle tehdään kertoimen laskenta, merkitään taulukkoon kertoimeen ja sarjanumeroineen.

Referenssiresonaattori mitataan Golden cavityssä sekä vertailtavassa cavityssä. Excel pohjan makro, laskee kertoimen automaattisesti sarakkeeseen, monistaen saman kertoimen tarkistusmittauksiin käytettäviin sarakkeisiin. Kertoimen laskennan jälkeen tarkistusmittaukset tehdään käyttäen eri resonaattoreita ja laskettua kerrointa. Tarkistusmittauksessa resonaattorit mitataan Golden cavityssä ja vertailucavityssä, korjataan vertailucavityn taajuu-
det lasketulla kertoimella ja verrataan mittatuloksia keskenään. (liite6). Taajuusvirheen ollessa pieni ja toistettavissa uusintamittauksilla käyttäen myös erityyppisiä resonaattoreilla, on kertoimen laskeminen onnistunut oikein.

Tehdyn opinnäytetyön aikana kertoimen toimintaa testattiin ainoastaan yleiscavityillä, mutta koska uusilla tuotteilla oli käytössä resonaattorispesifiset mittacavityt, oli kertoimen toimintaa testattava myös niiden osalta. Teimme vertailumittaukset käyttäen valmista kertoimen laskutaulukkoa ja totesimme menetelmän toimivan myös erityyppisten cavityjen kanssa.

Koska tuotekehityksellä oli ongelmia uuden tuotteen resonaattorimittausten kanssa, testasimme menetelmän toimivuutta kyseiselle tuotteelle. Tuotteelle valittiin Golden cavity, jonka taajuus korreloi todellisen suodattimen kanssa. Tämän jälkeen tehtiin vertailumittaukset ja laskettiin ja verifioitiin kertoimet toisille cavi-

tyille laskentataulukon avulla. Kun erä cavityjä oli verifioitu, lähetettiin ne eteenpäin valmistajille ja tehtiin vertailumittaukset eri lokaatioiden kesken. Menetelmä todettiin toimivaksi, sillä mittatulokset olivat korjauksen jälkeen vertailukelpoisia.

LÄHTEET

1. Alasaarela Esko. (1992). Elektroniikan suodattimet. 2. painos. Huhmari: Karprint kirjapaino
2. Arto Lehto, Räisänen Antti (2006) RF- ja mikroaaltotekniikka. 8. uudistettu painos. Helsinki: Otatieto
3. Arto Lehto, Räisänen Antti (2007) Radiotekniikan perusteet. 12. painos. Helsinki: Otatieto
4. RF-tekniikan perusteet (2013). [www.dokumentti] Saatavissa: <http://docplayer.fi/16539571-Rf-tekniikan-perusteet-bl50a0300.html> [10.03.2018]
5. Liimatainen P. (2005) Radiotekniikka. Luentomoniste [www-dokumentti] Saatavissa: <http://www.ee.oulu.fi/~kk/atsp/tutoriaalit/Liimatainen.pdf> [4.09.2017]
6. Electronics tutorials (2017) passive high pass filter [www-dokumentti] Saatavissa: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_3.html [7.10.2017]
7. RF Café (2018) Electronics tutorial- Tutorial on Quarter wave coaxial resonators [www-dokumentti] Saatavissa: <http://www.rfcafe.com/references/electrical/coaxial-resonator.htm> [1.2.2018]
8. Närhi H. (2010). Radiotaajuussuodattimen viritysjärjestelmän elektromekanikan kehittäminen. Diplomityö. Oulun yliopisto
9. Karhu K. (2015). Familiarize yourself with filters. Sisäinen moniste. Nokia Networks
10. Coaxial resonators. (2018). Exxelia product line tutorial document. [www-dokumentti]. Saatavissa: <http://www.exxelia.com/uploads/PDF/epsilon-90-1-4-v1.pdf>

11. Skyworks Coaxial resonators and inductors (2018). [www-tuotedokumentti]. Saatavissa: [http://www.trans-techinc.com/documents/Coaxial Resonators and Inductors 202699A.pdf](http://www.trans-techinc.com/documents/Coaxial_Resonators_and_Inductors_202699A.pdf)
12. Skyworks Glossary of terms for coaxial resonators and coaxial inductors (2018). [www-tuotedokumentti]. Saatavissa: [http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/Glossary of Terms 202728B AN.pdf](http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/Glossary_of_Terms_202728B_AN.pdf)
13. Dublexers. (2017). The Jack Daniel Company. [www-dokumentti]. Saatavissa: <http://www.repeater-builder.com/antenna/intro-to-duplexers/intro-to-duplexers.html> [7.8.2017]
14. Aalto yliopisto. (2017). Signaalien suodatus. Luentomoniste [www-dokumentti]. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/469994/mod_resource/content/1/vanhaluento_08.pdf
15. Holzbauer J. (2012). RF Theory and Design. Luentomoniste. [www-dokumentti]. Saatavissa: http://uspas.fnal.gov/materials/12MSU/RF_Design_Lecture_Notes.pdf
16. Juntunen T. (2011). Passiivisen koaksiaalisuodattimen kokoonpanon toistuvuuden seuranta RF-parametrien avulla. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.
17. Kuisma M. (2017). Passiiviset komponentit suodatuksessa. [www-dokumentti]. Saatavissa: <http://www.kuisma.eu/elper/4suodatus/1suodin.html>
18. I.S. Grant, W.R. Phillips. (1991). Electromagnetism. 2. painos. Norfolk: ISBN.
19. Ilpo R (2018) Sähköpostikeskustelu 01.03.2018
20. Suomi K. (1990). Johdatusta puheen akustiikkaan. Oulun yliopisto: ISBN

Machined Mushroom Resonator					
Resonator	Frequency: measure 1	Frequency: Measure 2	Unit	Difference between measure 1 / 2	Unit
1	1,9927200	1,9927450	GHz	-25,00	KHz
2	1,9927450	1,9926450	GHz	100,00	KHz
3	1,9924200	1,9923700	GHz	50,00	KHz
4	1,9921950	1,9922700	GHz	-75,00	KHz
5	1,9922700	1,9921200	GHz	150,00	KHz
6	1,9923700	1,9924200	GHz	-50,00	KHz
7	1,9935200	1,9935700	GHz	-50,00	KHz
8	1,9927950	1,9927950	GHz	0,00	KHz
9	1,9928450	1,9928450	GHz	0,00	KHz
10	1,9926950	1,9925950	GHz	100,00	KHz
Difference / MHz					
1,325					
Accuracy with grinded resonators.					
Resonator	Frequency: measure 1	Frequency: Measure 2	Unit	Difference between measure 1 / 2	Unit
1	2,09897	2,098995	GHz	-25	KHz
2	2,100045	2,09997	GHz	75	KHz
3	2,09947	2,09947	GHz	0	KHz
4	2,098845	2,09887	GHz	-25	KHz
5	2,09992	2,09992	GHz	0	KHz
6	2,09902	2,09897	GHz	50	KHz
7	2,09962	2,09967	GHz	-50	KHz
8	2,098195	2,098245	GHz	-50	KHz
9	2,100045	2,10007	GHz	-25	KHz
10	2,09922	2,099245	GHz	-25	KHz
Difference/ MHz					
-1,85					

Frequency	GOLDEN	LID1 /JIG1 adjusted to	LID1 /JIG2 adjusted to				
REF1	1,9587250	1,9587250					
REF2	1,9940250		1,9940250				
REF3	1,9928500						
Resonator	Golden	JIG1	JIG2	Unit	JIG1 to Golden	JIG2 to Golden	Unit
1	1,9774750	1,9781000	1,9778000	MHz	625,00	325,00	KHz
2	1,9812250	1,9811750	1,9813000	MHz	-50,00	75,00	KHz
3	1,9807500	1,9816250	1,9812750	MHz	875,00	525,00	KHz
4	1,9742000	1,9748000	1,9745750	MHz	600,00	375,00	KHz
5	1,9791750	1,9794250	1,9791500	MHz	250,00	-25,00	KHz
6	1,9739500	1,9745000	1,9743500	MHz	550,00	400,00	KHz
7	1,9741250	1,9747750	1,9746500	MHz	650,00	525,00	KHz
8	1,9827000	1,9835750	1,9832000	MHz	875,00	500,00	KHz
9	1,9854500	1,9861500	1,9859750	MHz	700,00	525,00	KHz
10	1,9822250	1,9829750	1,9826500	MHz	750,00	425,00	KHz
11	1,9819250	1,9827000	1,9824000	MHz	775,00	475,00	KHz
12	1,9861000	1,9867750	1,9865750	MHz	675,00	475,00	KHz

TAAJUUSEROJEN SUHDE

LIITE 3

[illegible]

LIITE 4

[illegible]

		Correction factor = $f1 / f2$	Calculated factor, inside the highlighted square				
		Corrected value = $f2 * \text{Correction factor}$					
		Difference to golden = $(\text{corrected value} - f1) * 1000$	Value should be less than 500KHz				
		Jig1 to Jig2, frequency difference without correction = $(f1 - f2) * 1000$	Follow that value drifting is systematical between the tested resonators				
Nro	Resonators	Golden / f1	REF Resonator in JIG X	Correction factor			
1	REF1	818,0875000	817,5000000	1,0007187	587,5		
	Resonator	Golden / f1	JX/ f2	Correction factor to JIG2	Corrected value JIG2	difference to Golden KHz	difference between cavities without correction KHz
	1	822,5250000	822,1250000	1,0007187	822,7158238	190,82	400,000
	2	823,8000000	823,4250000	1,0007187	824,0167580	216,76	375,000
	3	815,2250000	814,7000000	1,0007187	815,2854878	60,49	525,000
	4	817,1500000	816,6750000	1,0007187	817,2619071	111,91	475,000
	5	816,3750000	816,0000000	1,0007187	816,5864220	211,42	375,000
2	Resonators	Golden / f1	REF Resonator in JIG X	Correction factor			
	REF1	818,0875000	817,7000000	1,0004739	387,5		
	Resonator	Golden / f1	JX/ f2	Correction factor to JIG2	Corrected value JIG2	difference to Golden KHz	difference between cavities without correction KHz
	1	823,1250000	822,7750000	1,0004739	823,1649050	39,90	350,000
	2	824,5250000	824,2000000	1,0004739	824,5905803	65,58	325,000
	3	815,8250000	815,5250000	1,0004739	815,9114693	86,47	300,000